НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО

Н.Б.СУТОРИХИН
П.Н.БУРОВ
С.М.ЗАХАРОВА

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТЕЙ СВЯЗИ

Издательство «СВЯЗЬ»

НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО

Н.Б.СУТОРИХИН
П.Н.БУРОВ
С.М.ЗАХАРОВА

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТЕЙ СВЯЗИ

ПОД РЕДАКЦИЕЙ Н. Б. СУТОРИХИНА

МОСКВА «СВЯЗЬ» 1979

32.88
С89
УДК 621.3.019

Суторихин Н. Б. и др.

С89 Методы определения оптимальной надежности элементов сетей связи/Суторихин Н. Б., Буров П. Н., Захарова С. М.; Под ред. Н. Б. Суторихина. — М.: Связь, 1979. — 104 с., ил. — (межиздательская серия «Надежность и качество»).

40 к.

Описываются методы определения научно обоснованных (оптимальных) требований к надежности элементов коммутируемых телефонных сетей: коммутационных систем, управляющих устройств, оборудования каналов и трактов. Рассматриваются способы повышения надежности элементов телефонных сетей: резервирование, контроль работоспособности и прогрессивные методы технического обслуживания.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами надежности оборудования коммутируемых телефонных сетей. Она может быть полезна студентам старших курсов и аспирантам вузов связи.

С $\frac{30602—010}{045(01)—79}$ 49—79 2402040000 ББК 32.88
6Ф1

© Издательство «Связь», 1979 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Основными направлениями развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 годы», утвержденными XXV съездом КПСС, предусматривается продолжить создание Единой автоматизированной сети связи страны, что потребует дальнейшего увеличения протяженности междугородных телефонных каналов, значительного повышения уровня автоматизации междугородной телефонной связи, увеличения числа телефонов в городах и сельской местности. Дальнейшее расширение сети связи, предусматриваемое на ближайшее пятилетие и на более дальнюю перспективу, не может быть успешно претворено в жизнь без существенного повышения уровня надежности элементов сетей. При существующем уровне надежности и организации технического обслуживания оборудования и сооружений связи поставленная задача потребовала бы дополнительного привлечения колоссальных трудовых ресурсов.

Кроме того, повышение надежности элементов сетей, помимо повышения эффективности использования трудовых ресурсов, должно значительно повысить уровень использования основных фондов в хозяйстве связи, ускорить оборачиваемость оборотных средств на предприятиях-потребителях услуг связи, уменьшить излишние запасы материалов и оборудования. В связи с этим возникает вопрос: до какого уровня целесообразно повышать надежность элементов сетей, т. е. вопрос о научно обоснованных требованиях к надежности (нормах надежности) элементов сетей. В работе [2], на наш взгляд, правильно отмечается, что норму надежности можно считать обоснованной, если она целесообразна, т. е. в определенном смысле оптимальна.

Предлагаемая книга посвящена одному из наиболее важных вопросов проблемы надежности элементов сетей связи — методам определения оптимальной надежности элементов коммутируемых телефонных сетей. Отдельные положения, выдвинутые в книге, могут быть использованы и при определении надежности элементов сетей другого назначения. Книга является логическим продолжением монографии Н. Б. Суторихина «Оценка надежности элементов коммутируемых телефонных сетей», выпущенной издательством «Связь» в 1974 г., освещающей другой важный аспект упомянутой проблемы. В данной книге изложены в основном оригинальные, не публиковавшиеся ранее материалы, являющиеся результата-

ми исследований, проведенных в последние годы под руководством Н. Б. Суторихина.

Книга рассчитана на широкий круг научных работников и инженеров, работающих в области связи, а также аспирантов и студентов высших учебных заведений.

При изложении материала авторы, по мере возможности, стремились использовать элементарный математический аппарат. При этом предполагалось, что читатель знаком с основными понятиями теории вероятностей, теории массового обслуживания, техникой электросвязи, экономикой, организацией и планированием предприятий связи.

Введение и гл. 1 написаны Н. Б. Суторихиным, гл. 2—Н. Б. Суторихиным совместно с К. А. Зарецким, гл. 3—П. Н. Буровым, гл. 4 — С. М. Захаровой.

Авторы выражают благодарность К. А. Зарецкому, который оказал большую помощь при подготовке гл. 1.

Все замечания по книге авторы просят направлять в издательство «Связь» по адресу: 101000, Москва, Чистопрудный бульвар, 2.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Надежность является одной из важнейших проблем современности. Несмотря на молодость этой проблемы (дату ее постановки можно отнести к началу 50-х годов [2]), ей посвящено значительное количество серьезных работ. Наиболее подробно в них рассматриваются методы расчета показателей надежности, испытания на надежность, сбор и обработка статистических данных о надежности, методы обеспечения надежности и т. п. Однако один из важнейших вопросов теории надежности — вопрос определения научно обоснованных требований (норм) на показатели надежности — до сих пор остается фактически не разработанным. И это не случайно, так как этот вопрос не только выходит за рамки техники, но и представляет значительные трудности. Между тем без решения вопроса о научно обоснованных требованиях к надежности все остальные из перечисленных выше вопросов несколько теряют свой смысл. Например, возникает сомнение в необходимости расчета показателей надежности объекта, если неизвестно, какими они должны быть. Правда, в некоторых случаях делаются попытки сформулировать требования на показатели надежности различных объектов, но это чаще всего делается чисто интуитивным путем. Иногда интуиция специалистов подкрепляется ссылками на существующий уровень надежности аналогичных изделий. Часто в качестве основания при формулировании требований к надежности объекта принимаются зарубежные данные о надежности, носящие порой рекламный характер и не всегда отражающие действительное положение вещей. Если все вышесказанное справедливо по отношению к проблеме надежности технических систем в целом, то в части, касающейся специфических вопросов надежности оборудования, являющегося элементами сетей связи, дело обстоит несколько хуже.

Под элементом сети связи будем понимать оборудование, используемое на сети, такое, как: коммутационные системы, управляющие устройства, оборудование каналов и трактов и т. д. Нерешенным остается не только вопрос разработки научно обоснованных норм надежности, но и такие важные вопросы, как система специфических показателей качества обслуживания вызовов и надежности оборудования со стороны потребителя услуг связи — абонента, методика расчета и измерения этих показателей, статистика отказов оборудования связи и т. д. Решение проблемы

научно обоснованного выбора уровня надежности оборудования, являющегося элементом сети связи, имеет весьма важное значение для развития техники связи и таит в себе колоссальные резервы повышения качества обслуживания абонентов, роста производительности труда не только работников связи, но и работников других отраслей народного хозяйства, пользующихся услугами связи, а также экономии государственных средств. Проиллюстрируем эти положения несколькими примерами.

Пример 1. По сведениям академика В. А. Трапезникова, задержка в передаче информации об отгруженной продукции по Магнитогорскому комбинату только на один час требует увеличения оборотных средств на 80—90 тыс. рублей [3]. Можно представить, сколько государственных средств замораживается по всей стране из-за ненадежности средств связи!

Пример 2. Расчетами, проведенными в гл. 4, показано, что потери тарифных доходов предприятий связи и потери потребителей услуг связи[1] резко снижаются при увеличении надежности преобразовательного оборудования каналов и трактов путем создания оптимального резерва съемных блоков и панелей на оконечных и переприемных пунктах кабельной магистрали. При этом повышается и качество обслуживания потребителей услуг связи (абонентов).

Пример 3. Известно, что рост емкости городских и сельских телефонных сетей в значительной степени сдерживается тем обстоятельством, что существующее оборудование электромеханических систем АТС (особенно декадно-шаговых), будучи недостаточно надежным, весьма трудоемко в обслуживании. Для обеспечения требуемого увеличения емкости этих сетей при существующем оборудовании и методах технического обслуживания потребовались бы колоссальные трудовые ресурсы. Поэтому требуемый прирост емкости городских и сельских телефонных сетей можно будет обеспечить тогда, когда на сети будут применяться более надежные (например, квазиэлектронные и электронные) системы и новые прогрессивные методы их технического обслуживания. Это позволит резко сократить потребное количество обслуживающего персонала. В этой связи в технических заданиях на проектирование перспективных коммутационных узлов и станций задаются весьма жесткие требования на трудоемкость технического обслуживания узла или станции. Так, средняя суммарная трудоемкость технического обслуживания перспективных коммутационных узлов или станций за год, отнесенная к единице их емкости, принимается в пределах 0,05—0,2 человеко-часа.

---

[1] Следует отличать понятия «потери тарифных доходов», «потери предприятий связи», «потери потребителей услуг связи», о которых речь идет во введении и далее в гл. 4, от понятия «телефонные потери», которыми оценивается качество обслуживания вызовов на коммутационных узлах и станциях (гл. 2). Под потерями в данном случае следует понимать экономический ущерб, который наносится предприятиям связи и потребителям услуг связи ненадежностью элементов сетей связи.

Таких примеров можно привести много. Однако уже из вышеизложенного можно сделать вывод, что научно обоснованные требования (нормы) надежности элементов коммутируемых телефонных сетей должны определяться, в общем случае, таким образом, чтобы были обеспечены: заданное качество обслуживания вызовов, заданная трудоемкость технического обслуживания оборудования и минимум затрат и потерь предприятий связи и потребителей услуг связи или максимум отдачи на вложенные средства, зависящих от надежности элементов сетей. При этом требования к надежности оборудования должны основываться на достигнутом или реально достижимом на данном этапе уровне надежности компонентов, которые предполагается применить при разработке оборудования.

Очевидно, в некоторых случаях перечисленные условия могут быть противоречивыми, и тогда компромиссное решение может быть принято на основании опыта специалистов, подкрепленного анализом существующего уровня надежности аналогичных или близких к разрабатываемому изделий. Для некоторых элементов сетей может оказаться возможным ограничиться частью перечисленных условий. Например, для перспективных коммутационных узлов и станций задаются очень жесткие требования на трудоемкость их технического обслуживания. В то же время оценить влияние ненадежности коммутационного оборудования городских и сельских телефонных сетей на потери предприятий связи и потребителей услуг связи чрезвычайно трудно. Поэтому при определении требований к надежности городских и сельских коммутационных узлов и станций можно ограничиться первыми двумя условиями.

Для междугородных коммутационных узлов и станций большое значение имеет третье условие. Это обусловливается тем, что отказавшее оборудование междугородного узла или станции (особенно централизованное оборудование) блокирует не только станционное оборудование (часть или все), но и оборудование каналов (части или всех), включенных в узел или станцию, что приводит к значительным потерям доходов предприятий связи. Кроме того, задержка в передаче срочной информации приводит к значительным потерям у потребителей услуг связи. Поэтому для определения научно обоснованных требований к надежности оборудования междугородных коммутационных узлов и станций необходимо обеспечить выполнение всех трех условий.

Очевидно, при определении научно обоснованных требований к надежности оборудования каналов и трактов можно ограничиться лишь одним или двумя последними условиями. Рассмотрим более подробно перечисленные выше условия.

Качество обслуживания телефонных вызовов. Под качеством обслуживания телефонных вызовов понимается совокупность характеризующих их обслуживание показателей, таких, как телефонные потери, время ожидания и т. п. В теории телефонных сообщений основным показателем качества обслуживания телефон-

ных вызовов в системах с потерями является вероятность телефонных потерь. Кроме того, при определении телефонных потерь традиционно считается, что все приборы (линии) абсолютно надежны.

В настоящее время в достаточной степени доказано [1] то обстоятельство, что ненадежность оборудования коммутационных систем и пучков каналов, особенно группового и централизованного, отказ которого приводит к блокировке группы приборов (линий) или всей коммутационной системы, значительно влияет на телефонные потери. Поэтому оценка качества обслуживания телефонных вызовов без учета отказов оборудования не будет отражать фактическое качество обслуживания.

При выборе показателей качества обслуживания телефонных вызовов необходимо также учитывать особенности как эксплуатируемых в настоящее время коммутационных узлов и станций с децентрализованным управлением, так и перспективных с централизованным управлением. Эти особенности заключаются в том, что как существующее, так и перспективное оборудование коммутационных узлов и станций пока не может быть полностью охвачено непрерывным контролем. Часть отказов оборудования выявляется только при помощи периодического контроля (периодических профилактических проверок или автоматического периодического программного контроля). Это обстоятельство обусловливает случаи использования при установлении соединения неработоспособного оборудования, что приводит к потерям вызовов. В дальнейшем такую ситуацию условно будем называть «ложным обслуживанием». К потерям будут также приводить и отказы оборудования в процессе обслуживания вызовов. Такие события условимся называть «недообслуживанием». Следовательно, при оценке телефонных потерь должны быть учтены все три составляющие:

телефонные потери вследствие отсутствия свободных и незаблокированных приборов (линий);

телефонные потери вследствие использования неработоспособных и незаблокированных приборов (ложное обслуживание);

телефонные потери вследствие отказов оборудования в процессе обслуживания вызова (недообслуживание).

Кроме того, имеется еще целый ряд специфических особенностей, которые в основном присущи перспективным коммутационным узлам и станциям. К таким особенностям относится наличие на узлах и станциях оборудования, отказ которого приводит либо к полному прекращению функционирования всей станции или узла (централизованное оборудование, электропитающие устройства), либо к невозможности использования группы приборов или линий (групповые устройства). Кроме того, вследствие иерархической структуры построения перспективных узлов и станций отказы оборудования одной ступени могут вызвать блокировку оборудования других ступеней. На перспективных узлах и станциях предполагается использование новых прогрессивных способов технического обслуживания оборудования.

На перспективных узлах и станциях с централизованным управлением могут возникнуть ситуации, когда телефонные потери в одном, нескольких или всех направлениях связи в течение некоторых промежутков времени будут достигать значительных величин, в том числе и 100%, когда полностью прекращается функционирование коммутационного узла и станции. Длительность таких ситуаций может измеряться десятками минут или быть кратковременной (до нескольких секунд), вызванной сбоями, применением программных методов контроля, реконфигурацией управляющих устройств и т. п. Очевидно, что для нормального функционирования узла или станции, а также для возможности субъективной оценки абонентами качества обслуживания вызовов длительность таких ситуаций небезразлична. Поэтому для оценки качества обслуживания вызовов большое значение имеет не только величина телефонных потерь на протяжении аварийной ситуации, но и длительность самой ситуации.

Таким образом, для более полной оценки качества обслуживания вызовов коммутационным узлом или станцией наряду со средним значением телефонных потерь необходимо использовать указанные выше показатели. Следует заметить, что при задании допустимых значений показателей качества обслуживания вызовов необходимо учитывать как субъективную оценку абонентами качества обслуживания с точки зрения суммарной длительности и длительности отдельных аварийных ситуаций, на протяжении которых телефонные потери имеют определенные значения, так и объективные последствия таких ситуаций. Однако вопрос определения научно обоснованных норм на показатели качества обслуживания вызовов выходит за рамки данной книги и в ней не рассматривается.

Учет трудоемкости технического обслуживания оборудования. При проектировании коммутационных узлов и станций обязательно задается трудоемкость их технического обслуживания за год, отнесенная к единице емкости узла или станции. Поэтому определение показателей надежности оборудования коммутационных узлов и станций, исходя из заданной трудоемкости их технического обслуживания, сводится к следующему. Зная емкость узла, станции или сети с определенным числом узлов и станций и заданное значение показателя трудоемкости обслуживания, подсчитывают суммарную трудоемкость их технического обслуживания за год. Исходя из годового фонда рабочего времени одного работника, определяют максимально допустимое количество обслуживающего персонала. Далее определяют показатели надежности оборудования различных ступеней иерархической структуры узлов или станций. При этом выбирают оптимальное значение показателей надежности для вариантов с различной стратегией технического обслуживания с учетом таких факторов, как уровень надежности компонентов, на базе которых проектируется оборудование, степень централизации коммутационного оборудования, конфигурация сети, система автоматического контроля работоспособности

оборудования, объем ЗИП. Если требования к показателям надежности оборудования определяются исходя из заданного качества обслуживания вызовов, то одновременно с определением показателей надежности оцениваются показатели качества обслуживания вызовов. Предпочтение отдается тому варианту, при котором качество обслуживания будет не ниже допустимого.

Учет экономических показателей. Уровень надежности оборудования, являющегося элементом сети, оказывает существенное влияние на экономическую сторону деятельности как эксплуатационных предприятий связи и предприятий, производящих оборудование связи, так и потребителей услуг связи. Повышение уровня надежности элементов сетей, с одной стороны, требует определенных дополнительных затрат, связанных с применением деталей повышенной надежности или резервированием оборудования, а с другой стороны, приводит к уменьшению потерь предприятий связи и потребителей услуг связи из-за сокращения прерывистости производственного процесса по передаче информации. Величина дополнительных затрат может значительно превышать экономию предприятий связи и потребителей услуг связи, полученную от повышения надежности. Поэтому не всегда целесообразно применять элементы сетей с высоким уровнем надежности. Занижение требований к надежности элементов сетей связи может привести к резкому увеличению потерь предприятий связи и потребителей услуг связи. Поэтому при определении требований к надежности элементов сетей связи необходимо учитывать эти противоречивые тенденции.

Уровень надежности элементов сетей связи должен быть экономически оправдан, т. е. обеспечивать максимальный экономический эффект. Это обусловливается и действующей системой планирования и экономического стимулирования, в условиях которой как отдельные предприятия, так и народное хозяйство в целом заинтересованы в лучшем использовании основных фондов и во внедрении техники, обеспечивающей наибольшую отдачу на вложенные средства. Максимальный экономический эффект с точки зрения интересов народного хозяйства достигается при минимальных суммарных затратах и потерях, определяемых надежностью элементов сетей и учитываемых на всех этапах — от разработки и производства оборудования связи до потребления услуг связи, и при максимальной отдаче средств, затрачиваемых на оборудование и учитываемых также на всех этапах. Поэтому определение оптимальной надежности элементов сетей связи по экономическому критерию может быть произведено одним из двух методов:

по минимуму суммарных народнохозяйственных затрат и потерь, зависящих от надежности элементов сетей связи;

по максимуму отдачи на вложенные средства, зависящие от надежности элементов сетей связи.

Если необходимо, чтобы показатели надежности удовлетворяли всем перечисленным выше условиям, следует ввести ограничения по трудоемкости технического обслуживания оборудования и

качеству обслуживания вызовов. При этом оптимальным будет вариант, при котором обеспечивается либо минимум затрат и потерь, либо максимум отдачи на вложенные средства, зависящих от надежности оборудования связи при условии, что трудоемкость технического обслуживания оборудования не будет превышать заданной величины, а качество обслуживания вызовов будет не ниже допустимого. Могут быть введены ограничения и на капитальные затраты.

Таким образом, при определении научно обоснованных требований к надежности оборудования необходимо решить одну из следующих задач:

1) получить максимальную надежность элемента сети при условии, что трудоемкость технического обслуживания оборудования не будет превышать заданного значения, а качество обслуживания вызовов не будет ниже допустимого. При этом варьируются стратегия технического обслуживания, способы обеспечения надежности оборудования и прочие факторы;

2) или определить надежность элемента сети, при которой обеспечивается минимум затрат и потерь или максимум отдачи на вложенные средства, зависящих от надежности оборудования при условии, что трудоемкость не будет превышать заданного значения, а качество обслуживания вызовов не будет ниже допустимого.

Могут быть поставлены ограничения и на капитальные затраты. Однако в зависимости от конкретного оборудования некоторые или даже все ограничения могут быть сняты. При этом варьируются способы обеспечения надежности оборудования, стратегия технического обслуживания оборудования и прочие факторы.

Решаются эти задачи простым перебором конечного числа конкретных вариантов. Другие способы оптимизации здесь применять нецелесообразно по следующим причинам.

1. Для каждого типа оборудования, являющегося элементом сети, можно наметить лишь ограниченное число конкретных вариантов обеспечения надежности. К примеру, если обеспечение надежности кабельной магистрали решено осуществить введением посекционного резервирования, то, например, для кабеля КМБ-8 можно наметить лишь три варианта кратности резервирования: 1:1; 2:2 и 3:1. Кроме этого, можно еще наметить несколько вариантов длин секций.

2. При решении задач необходимо одновременно учитывать очень большое число различных факторов, влияющих как на показатели надежности оборудования, так и на критерии, по которым производится оптимизация.

Несколько слов следует сказать о показателях, с помощью которых целесообразно оценивать надежность оборудования, являющегося элементом сети.

Известно, что надежность является комплексным свойством, которое может включать такие свойства, как безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость. Причем в зави-

симости от назначения объекта и условий его эксплуатации эти свойства могут иметь различную значимость. Для элементов сетей важнейшими из этих свойств являются безотказность и ремонтопригодность. Поэтому оценку надежности элемента сети целесообразно производить комплексными показателями, которые бы отражали два указанных выше свойства.

Этим требованиям удовлетворяют такие показатели, как коэффициент готовности ($K_г$) и коэффициент простоя ($K_п$), связанные простой зависимостью: $K_г = 1 - K_п$. Заметим при этом, что коэффициент простоя является одним из важнейших показателей для оценки надежности элементов коммутируемых телефонных сетей, так как он имеет определенный физический смысл с точки зрения качества обслуживания вызовов на сети. Так, например, коэффициент простоя централизованного управляющего устройства, отказ которого приводит к отказу всей группы приборов данного направления связи, однозначно определяет телефонные потери в направлении связи вследствие ненадежности указанного оборудования. То же можно сказать и в отношении коэффициента простоя группового и линейного трактов магистрали связи, по которым организован пучок линий данного направления связи. Это видно из приводимых ниже расчетных соотношений, а также показано в [1].

Поэтому при дальнейшем изложении в большинстве случаев надежность элемента сети будет оцениваться именно этими показателями.

В заключение представляется целесообразным сделать следующие замечания о структуре и содержании книги.

В гл. 1 излагаются способы обеспечения надежности оборудования, являющегося элементом коммутируемой телефонной сети. Это является необходимым, поскольку задача определения оптимальной надежности элементов сетей требует анализа реальных способов повышения надежности элементов сетей: коммутационного, управляющего оборудования и оборудования каналов и трактов. В этой главе рассматриваются способы обеспечения надежности, воздействующие на безотказность и ремонтопригодность. При этом упор делается на наиболее реальные способы — резервирование и контроль работоспособности оборудования. Вопрос уменьшения времени простоя оборудования путем выбора рациональной системы технического обслуживания, для удобства изложения, перенесен в гл. 3.

В гл. 2 излагаются вопросы, связанные с оценкой качества обслуживания телефонных вызовов с учетом надежности и способов контроля приборов коммутационной системы. Здесь излагается оценка таких показателей, как среднее значение вероятности телефонных потерь, вероятность телефонных потерь для направления или вида связи за время простоя и средняя длительность одного простоя из-за отказов оборудования коммутационного узла или станции. Расчет перечисленных показателей дается при периодическом и комбинированном контроле работоспособности обору-

дования. При этом рассматриваются полнодоступная группа приборов коммутационной системы и двухзвенная коммутационная система. Оценку качества обслуживания вызовов в более сложных коммутационных системах рекомендуется получать в результате статистического моделирования системы в отдельных аварийных ситуациях. Оценка качества обслуживания вызовов в коммутационных системах при непрерывном контроле работоспособности оборудования не рассматривается, поскольку этот вопрос подробно рассмотрен в [1]. Некоторые вспомогательные выводы и громоздкие формулы вынесены в приложения.

Глава 3 посвящена определению требований к надежности элементов сетей при заданной трудоемкости их технического обслуживания. Здесь же рассматриваются методы технического обслуживания оборудования, являющегося элементом сети, и их влияние на надежность элементов сетей.

В гл. 4 излагаются методы определения оптимальной надежности элементов сетей по экономическому критерию.

Таким образом, в гл. 2, 3 и 4 излагаются методы определения научно обоснованных требований к надежности элементов сетей, которые удовлетворяли бы сформулированным выше трем условиям: заданному качеству обслуживания вызовов, заданной трудоемкости технического обслуживания оборудования — и обеспечивали бы минимум затрат и потерь предприятий связи и потребителей услуг связи или максимум отдачи на вложенные средства, зависящих от надежности элементов сетей.

В гл. 2 и 3 даются отдельные примеры применения изложенных методов.

Тем не менее читатели не найдут в книге готовых рецептов определения требований к надежности для каждого конкретного элемента сети. Это обусловлено ограниченным объемом книги, да и вряд ли в этом есть необходимость. Анализируя методы, изложенные в книге, читатель сможет сам в каждом конкретном случае выбрать необходимые методы и применить их для определения требований к надежности рассматриваемого оборудования.

Глава 1 ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТЕЙ СВЯЗИ

1.1. Общие положения

Под обеспечением надежности элемента сети понимается совокупность мероприятий, направленных на достижение или поддержание заданных показателей надежности на всех стадиях его существования. Надежность — сложное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать в себя безотказность, ремонтопригодность, долговечность и сохраняемость как в отдельности, так и определенное сочетание этих свойств. Для таких объектов, как элемент сети связи, наиболее важными свойствами, составляющими надежность, являются безотказность и ремонтопригодность. Поэтому с целью обеспечения надежности элемента сети необходимо выполнять мероприятия, как воздействующие на безотказность элемента, так и воздействующие на его ремонтопригодность.

К мероприятиям, воздействующим на безотказность элемента, можно отнести использование деталей повышенной надежности и резервирование. Последнее является наиболее реальным и поэтому основным способом повышения надежности. К мероприятиям, воздействующим на ремонтопригодность, следует отнести такие, как контроль работоспособности оборудования различными способами и сокращение времени простоя элементов путем выбора рациональной системы эксплуатационно-технического обслуживания на сети. Поэтому оценку надежности элементов сетей целесообразно производить по комплексным показателям, отражающим как безотказность, так и ремонтопригодность. Такими показателями являются коэффициент готовности и коэффициент простоя. В некоторых случаях, например при оценке влияния на надежность элемента сети периодического контроля работоспособности оборудования, можно отдельно определять такие составляющие коэффициента простоя, как:

вероятность того, что в произвольный момент времени элемент сети неработоспособен и заблокирован (его отказ обнаружен системой контроля), т. е. не может быть использован для обслуживания вызова;

вероятность того, что в произвольный момент времени элемент сети неработоспособен, но не заблокирован (его отказ еще не обнаружен системой контроля), вследствие чего он может быть использован при попытке обслуживания вызовов, что приведет к их потере («ложное обслуживание»).

1.2. Способы обеспечения надежности управляющих устройств коммутационных узлов и станций

В зависимости от принципа построения управляющие устройства (УУ) делятся на индивидуальные для каждого прибора (декадно-шаговые АТС), групповые, управляющие группой приборов (некоторые типы координатных АТС), и централизованные, управляющие всеми соединениями в пределах узла, станции или даже сети (квазиэлектронные и электронные коммутационные узлы и станции). Отказ индивидуального УУ приведет к отказу, а после его обнаружения к блокировке только одного прибора, отказ группового УУ вызовет блокировку группы приборов, а отказ централизованного УУ—блокировку приборов всего узла или станции. При централизованном управлении в состав УУ могут входить отдельные функциональные блоки, отказ которых приводит к отказу отдельной группы приборов. Централизация управления на перспективных коммутационных узлах и станциях требует специальных мер по обеспечению высокой надежности УУ.

К основным мерам обеспечения требуемой надежности УУ следует отнести автоматический контроль работоспособности оборудования и резервирование различными способами как УУ в целом, так и отдельных его функциональных блоков. Кроме автоматического контроля работоспособности оборудования, возможен контроль, осуществляемый техническим персоналом по графику через определенные (обычно равные) промежутки времени.

Методы автоматического контроля работоспособности оборудования УУ делятся на аппаратные, программные и комбинированные [4]. Аппаратный контроль заключается в том, что УУ контролируются непрерывно и в темпе с основными операциями при помощи введенного в его структуру контрольного оборудования. Программный контроль может выполняться программно-логическими и тестовыми методами. Первые позволяют контролировать работоспособность УУ в процессе выполнения основных программ путем использования повторных вычислений, контрольных соотношений, смысловых проверок, алгоритмического контроля, т. е. практически непрерывно. Тестовый контроль выполняется при помощи специальных тестовых и диагностических программ. Он осуществляется только периодически либо в отсутствие вызовов, т. е. когда основные программы не выполняются, либо при перерыве основных программ на время тестового контроля.

С точки зрения влияния на показатели надежности оборудования, автоматический контроль удобнее делить на следующие виды:

1) непрерывный контроль, который в основном выполняется аппаратным и программно-логическим методами;

2) периодический, который выполняется тестовым методом или обслуживающим персоналом по графику через определенные промежутки времени;

3) комбинированный контроль, когда часть отказов обнаруживается методами непрерывного контроля, а другая часть отказов — методами периодического контроля.

С целью обеспечения надежности УУ применяются следующие способы резервирования [5], [6], [7].

Параллельная работа двух УУ (двухмашинный управляющий комплекс), когда два управляющих устройства одновременно обрабатывают одну и ту же информацию и передают ее в сравнивающее устройство. При несовпадении результатов процесс установления соединения прерывается и запускаются контрольные программы для выявления отказавшего УУ. После обнаружения отказавшего УУ оно блокируется и осуществляется его ремонт, а работу продолжает одно работоспособное УУ.

Поочередная работа УУ, при которой каждый вызов обслуживается одним УУ. В случае отказа одного УУ второе работоспособное УУ берет на себя обслуживание всех соединений. Все промежуточные данные об устанавливаемом соединении передаются по каналам связи от одного УУ к другому. Поэтому при обнаружении отказа одного УУ другое может продолжить установление соединения, начатого первым.

Параллельная работа двух УУ при взаимном резервировании функциональных блоков (ФБ), когда за каждым УУ закрепляются соответствующие ФБ. При отказе одного из блоков и обнаружении отказа системой контроля блокируются не все УУ, а только отказавший ФБ. Обслуживание блоков обоих УУ передается второму ФБ.

Поочередная работа двух УУ при взаимном резервировании ФБ, когда в установлении соединения могут принимать участие ФБ разных УУ, т. е. оставшийся работоспособным блок после обнаружения отказа другого берет на себя обслуживание обоих УУ.

Многомашинный принцип построения УУ, при котором управляющий комплекс может содержать от 1 до n УУ в зависимости от требуемой производительности. В дальнейшем будет рассмотрен случай обеспечения надежности при $n>2$, так как при $n=1$ управляющее устройство не резервируется, а при $n=2$ применяется способ поочередной работы двух УУ. При этом может иметь место некоторое ухудшение качества обслуживания за счет увеличения времени ожидания и времени установления соединений.

Многопроцессорный принцип построения УУ, при котором в качестве ФБ одного вида используются процессоры (их число может быть более двух). Процессоры имеют одинаковые возможности для связи на определенное время с ФБ других видов. Отдельные пары (тройки) ФБ могут программно настраиваться на параллельную работу и иметь возможность перестройки при возникновении отказов отдельных блоков.

1.3. Надежность устройства при различных способах контроля работоспособности

Рассмотрим одиночное нерезервированное устройство (функциональный блок, отдельный прибор) с параметром потока отказов ω, интенсивностью восстановления $\mu = 1/T_в$, где $T_в$ — среднее время восстановления. Предполагается, что время наработки между отказами и время восстановления распределены по экспоненциальному закону. Восстановление устройства начинается немедленно после обнаружения отказа, при этом устройство блокируется и не может быть использовано для обслуживания вызова.

Непрерывный контроль. Этот вид контроля позволяет обнаружить все отказы. При осуществлении непрерывного контроля коэффициент готовности устройства рассчитывается по известному выражению

$$K_г = 1/(1 + \omega T_в) = \mu/(\omega + \mu); \qquad (1.1)$$

вероятность того, что устройство заблокировано и ремонтируется, определяется коэффициентом простоя

$$K_п = 1 - K_г = \omega T_в/(1 + \omega T_в) = \omega/(\omega + \mu).$$

Периодический контроль. Устройство, контролируемое периодически, может находиться в трех состояниях: работоспособном; неработоспособном заблокированном и неработоспособном незаблокированном. Если при попытке установления соединения используется устройство, находящееся в третьем состоянии, то возникает потеря вызова. Такую ситуацию в дальнейшем условимся называть «ложным обслуживанием». Рассмотрим два случая периодического контроля:

контроль с постоянным периодом, осуществляемый через равные промежутки времени;

контроль со случайным периодом, осуществляемый через случайные промежутки времени.

Для контроля с постоянным периодом ($\tau = \text{const}$) [8] и [9] обозначим через $P_1(t)$, $P_2(t)$ и $P_3(t)$ вероятности соответствующих состояний устройства в момент времени t, отсчитываемый с момента последней, k-й проверки в предположении, что $k \to \infty$, т. е. когда вероятности состояний не зависят от числа проведенных проверок. Опуская вывод, приведем выражения для этих вероятностей:

$$P_1(t) = \frac{(1 - e^{-\mu\tau})\, e^{-\omega t} - (1 - e^{-\omega\tau})\, e^{-\mu t}}{(1 - e^{-\mu\tau}) - \frac{\omega}{\mu}(1 - e^{-\omega\tau})}; \qquad (1.2)$$

$$P_2(t) = \frac{(1 - e^{-\omega\tau})\left(1 - \frac{\omega}{\mu}\right) e^{-\mu t}}{(1 - e^{-\mu\tau}) - \frac{\omega}{\mu}(1 - e^{-\omega\tau})}; \qquad (1.3)$$

$$P_3(t) = 1 - P_1(t) - P_2(t). \qquad (1.4)$$

Если эти вероятности состояний усреднить по времени, то

$$P_1=\frac{(1-e^{-\mu\tau})(1-e^{-\omega\tau})\frac{\mu-\omega}{\mu\omega\tau}}{(1-e^{-\mu\tau})-\frac{\omega}{\mu}(1-e^{-\omega\tau})};$$

$$P_2=\frac{\omega}{\mu}P_1;\quad P_3=1-\left(1+\frac{\omega}{\mu}\right)P_1.$$

Очевидно (в соответствии с § 1.1), вероятность P_1 имеет смысл коэффициента готовности, а $P_2+P_3=K_{\text{п}}$.

При случайном периоде контроля, когда контроль осуществляется через случайные промежутки времени, не зависящие друг от друга и имеющие некоторое распределение со средним значением τ и коэффициентом вариации $v=\sigma(t)/\tau$, задача может быть решена следующим образом.

Определим среднюю длительность промежутка времени от произвольного момента до ближайшей проверки. Для этого воспользуемся известным выражением для аналогичного случая [10]

$$\theta=\tau(1+v^2)/2. \tag{1.5}$$

Учитывая, что устройство может находиться в указанных выше трех состояниях, обозначим стационарные значения соответствующих вероятностей через P_1, P_2 и P_3. В этом случае при условии $\omega\ll\mu$ состояния устройства могут быть приближенно описаны

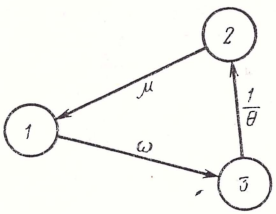

Рис. 1.1

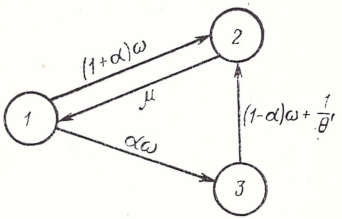

Рис. 1.2

марковским процессом. Граф переходов показан на рис. 1.1. Значения вероятностей состояний можно найти из системы линейных алгебраических уравнений

$$\left.\begin{aligned}-\omega P_1+\mu P_2&=0;\\ -\mu P_2+\frac{1}{\theta}P_3&=0;\\ \omega P_1-\frac{1}{\theta}P_3&=0\end{aligned}\right\} \tag{1.6}$$

при условии нормировки $\sum_{i=1}^{3}P_i=1$. Решение уравнений (1.6) дает следующий результат:

$$P_1=1/(1+\omega T_{\text{п}}); \tag{1.7}$$

$$P_2 = \omega T_в/(1+\omega T_п); \quad (1.8)$$

$$P_3 = \omega\theta/(1+\omega T_п), \quad (1.9)$$

где $T_п$ — среднее время простоя устройства от момента возникновения отказа до момента окончания восстановления, которое определяется из

$$T_п = T_в + \theta. \quad (1.10)$$

Очевидно, при экспоненциальном законе распределения периода контроля $\theta = \tau$ задача имеет точное решение.

Комбинированный контроль. Для комбинированного контроля, когда непрерывным контролем обнаруживается только часть $(1-\alpha)$ отказов с параметром потока $(1-\alpha)\omega$, а остальные отказы с параметром потока $\alpha\omega$ обнаруживаются периодическим контролем со случайным периодом и средней длительностью промежутка времени от произвольного момента до ближайшей проверки θ' (1.5), граф переходов показан на рис. 1.2. Стационарные значения вероятностей состояний находим из системы уравнений

$$-\omega P_1 + \mu P_2 = 0;$$

$$(1-\alpha)\omega P_1 - \mu P_2 + \left[(1-\alpha)\omega + \frac{1}{\theta'}\right] P_3 = 0;$$

$$\alpha\omega P_1 - \left[(1-\alpha)\omega + \frac{1}{\theta'}\right] P_3 = 0$$

при условии нормировки $\sum_{i=1}^{3} P_i = 1$. Решая систему уравнений, получим выражения, аналогичные (1.7)—(1.9), в которых $T_п$ определяется из (1.10), а

$$\theta = \alpha\theta'/[1+(1-\alpha)\theta'\omega]. \quad (1.11)$$

Очевидно, при $\omega\theta' \ll 1$ приближенно

$$T_п \approx T_в + \alpha\theta'.$$

Последнее выражение показывает, что в рассмотренном случае комбинированного контроля среднее время простоя оборудования будет таким же, как и в случае периодического контроля с меньшим периодом $\theta = \alpha\theta'$.

Ненадежный контроль. Выше при рассмотрении способов контроля работоспособности оборудования не учитывалась ненадежность системы контроля. Рассмотрим задачу на примере комбинированного контроля. Придадим величине α смысл вероятности того, что непрерывный контроль воспримет отказавшее устройство как работоспособное, и оно останется незаблокированным. Очевидно, вероятность того, что система непрерывного контроля немедленно обнаружит отказ устройства и оно заблокируется, будет $1-\alpha$. Пусть с вероятностью $\beta\Delta t$ работоспособное устройство блокируется ошибочно в течение времени Δt. С такой же вероятностью блокируется неработоспособное, но незаблокированное устройство.

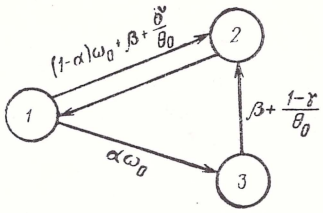

Рис. 1.3

Система периодического котроля со случайным периодом контроля с вероятностью $1-\gamma$ обнаруживает отказ устройства, и оно блокируется и с вероятностью δ ошибочно блокирует работоспособное устройство. Обозначим параметры системы периодического контроля через θ_0, τ_0 и v_0, значения которых аналогичны (1.5). Граф переходов в этом случае будет иметь вид, показанный на рис. 1.3. Если обозначить

$$\left.\begin{aligned}\omega &= \omega_0+\beta+\frac{\delta}{\theta_0};\\ \theta &= \frac{\alpha\omega_0}{\left(\omega_0+\beta+\frac{\delta}{\theta_0}\right)\left(\beta+\frac{1-\gamma}{\theta_0}\right)},\end{aligned}\right\} \qquad (1.12)$$

то система уравнений сведется к системе (1.6) и будет иметь решение (1.7)—(1.9) с учетом обозначений (1.12). Рассмотрим некоторые частные случаи этой задачи.

1. Осуществляется только непрерывный контроль, т. е. $\theta_0\to\infty$. В этом случае

$$\omega=\omega_0+\beta;\quad \theta=\alpha\omega_0/(\omega_0+\beta)\beta.$$

2. Осуществляется только непрерывный контроль, который достоверно обнаруживает отказы, т. е. $\theta_0\to\infty$, $\alpha=0$. Тогда

$$\omega=\omega_0+\beta;\quad \theta=0.$$

3. Осуществляется только периодический контроль, т. е. $\alpha=1$, $\beta=0$. В этом случае

$$\omega=\omega_0+\frac{\delta}{\theta_0};\quad \theta=\frac{\omega_0}{\left(\omega_0+\frac{\delta}{\theta_0}\right)\frac{1-\gamma}{\theta_0}}.$$

4. Контроль комбинированный, но периодический контроль достоверно обнаруживает отказы, т. е. $\gamma=0$. Тогда

$$\omega=\omega_0+\beta+\frac{\delta}{\theta_0};\quad \theta=\alpha\omega_0\Big/\left(\omega_0+\beta+\frac{\delta}{\theta_0}\right)\left(\beta+\frac{1}{\theta_0}\right).$$

5. Контроль комбинированный, но ошибочные блокировки оборудования отсутствуют и периодический контроль достоверно обнаруживает отказы, т. е. $\beta=0$; $\gamma=0$; $\delta=0$. В этом случае

$$\omega=\omega_0;\quad \theta=\alpha\theta_0,$$

т. е. результат получается аналогичным рассмотренной выше задаче, когда периодическим контролем охвачена часть оборудования с параметром потока отказов $\alpha\omega$.

1.4. Надежность управляющего комплекса при различных методах резервирования и контроля работоспособности оборудования

Проанализируем перечисленные в § 1.2 способы резервирования УУ при различных методах контроля работоспособности оборудования. При этом сделаем допущение, что после обнаружения отказа системой контроля блокировка отказавшего УУ или ФБ и соответствующие переключения происходят мгновенно. Кратковременные отключения управляющего комплекса (УК) от выполнения основных функций по обслуживанию вызовов, вызванные сбоями, применением программных методов контроля, реконфигурацией УУ, во внимание принимать не будем. Логические схемы расчета надежности УК при параллельной и поочередной работе УУ будут одинаковыми (рис. 1.4*а*). Одинаковыми они бу-

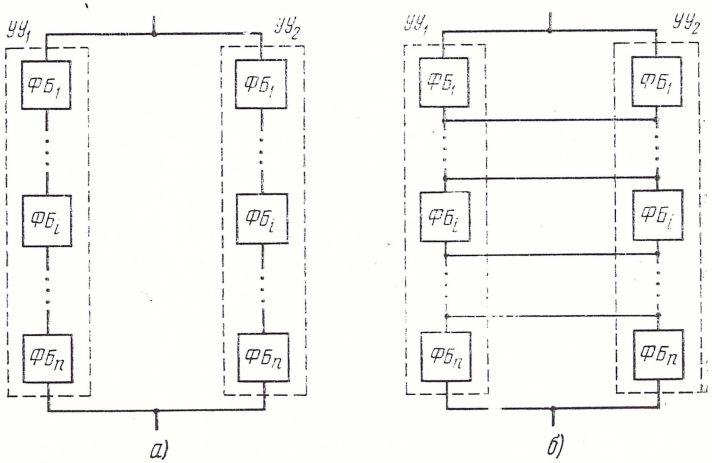

Рис. 1.4

дут для этих же случаев, но при взаимном резервировании ФБ (рис. 1.4*б*). Логические схемы расчета надежности при многомашинном и многопроцессорном способах построения УК изображены соответственно на рис. 1.5*а* и *б*.

Непрерывный контроль УУ. При наличии непрерывного контроля, способного обнаружить 100% возникающих в каждом из УУ отказов, и при принятых выше допущениях первые два способа резервирования УУ дадут одинаковую надежность УК. В обоих случаях коэффициент готовности УК будет равен

$$K_{г\,(УК)} = 1-(1-K_г)^2,$$

где $K_г$ — коэффициент готовности УУ, определяемый из (1.1). Одинаковую надежность дадут и третий и четвертый способы:

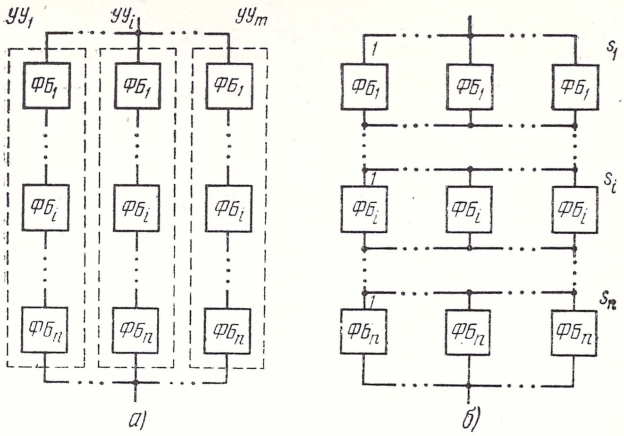

Рис. 1.5

$$K_{\text{г (УК)}} = \prod_{i=1}^{n} [1-(1-K_{\text{г (ФБ)}i})^2], \qquad (1.13)$$

где $K_{\text{г(ФБ)}i}$—коэффициент готовности i-го функционального блока. Соответственно при пятом способе

$$K_{\text{г (УК)}} = 1-(1-K_{\text{г}})^s,$$

где s — количество УУ. При шестом способе

$$K_{\text{г (УК)}} = \prod_{i=1}^{n} [1-(1-K_{\text{г (ФБ)}i})^{s_i}],$$

где s_i — количество i-х ФБ.

Таким образом, если обеспечить возможность непрерывного контроля работоспособности каждого УУ, что возможно при построении УУ на больших интегральных схемах (элементы четвертого поколения) и интегральных запоминающих устройствах, когда возможности аппаратного контроля возрастают и позволяют охватить практически 100% оборудования УУ [11], то можно отказаться от параллельной работы двух УУ. Это позволит расширить диапазон емкости коммутационных узлов (станций), обслуживаемых УК, в 2 раза при некотором снижении качества обслуживания во время ремонта одного из отказавших УУ. Еще бóльшую гибкость дают многомашинный и многопроцессорный принципы построения УК. Однако на элементах третьего поколения не удается охватить аппаратным контролем все оборудование УУ. В этих случаях применяется комбинированный контроль, когда непрерывным контролем обнаруживается лишь часть $(1-\alpha)$ отказов, а остальная часть — периодическим. По данным [4] аппаратный контроль позволяет охватить только 70—80% оборудования УУ.

Параллельная работа двух УУ при комбинированном контроле. При параллельной работе двух работоспособных УУ практически все возникающие отказы будут немедленно обнаружены не-

прерывным контролем. Если работоспособным останется только одно УУ, то непрерывным контролем можно обнаружить только часть $(1-\alpha)$ отказов, остальные отказы (α) обнаруживаются периодическим (тестовым) контролем, чаще всего со случайным периодом контроля. При этом может иметь место «ложное обслуживание» вследствие необнаруженных непрерывным контролем отказов.

В общем случае УК из двух УУ при комбинированном контроле может находиться в девяти состояниях (см. табл. 1.1). При параллельной работе УУ безразлично, какое из УУ находится в не-

Таблица 1.1

№ состояния УК	Состояние $УУ_1$	Состояние $УУ_2$	№ состояния УК	Состояние $УУ_1$	Состояние $УУ_2$
1	*р*	*р*	*6*	*з*	*н*
2	*р*	*з*	*7*	*н*	*р*
3	*р*	*н*	*8*	*н*	*з*
4	*з*	*р*	*9*	*н*	*н*
5	*з*	*з*			

Примечание. *р* — работоспособное; *з* — неработоспособное и заблокированное; *н* — неработоспособное и незаблокированное.

работоспособном состоянии, поэтому состояния *2* и *4* следует объединить в одно, так же как и состояния *6* и *8*. Кроме того, при принятых допущениях невозможны состояния *3* и *7*, так как при наличии одного работоспособного УУ второе отказавшее должно быть немедленно заблокировано. Точно так же, если оба УУ неработоспособны (состояние *9*), то они будут заблокированы (так как получение в этом случае одинаковых результатов обработки информации маловероятно). Поэтому при параллельной работе двух УУ возможны только четыре состояния УК:

1'-е $р—р$;

2'-е $р—з\ (з—р)$;

3'-е $з—з$;

4'-е $з—н\ (н—з)$.

Будем считать, что случайные промежутки времени между проверками распределены по произвольному закону со средним зна-

чением τ и коэффициентом вариации $v=\sigma(t)/\tau$. Средняя длительность промежутка времени от произвольного момента до ближайшей проверки θ' определяется из (1.5). Граф переходов показан на рис. 1.6.

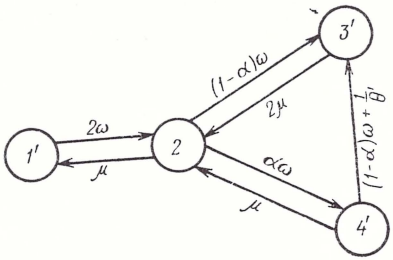

Рис. 1.6

Стационарные вероятности состояний УК (P'_1, P'_2, P'_3 и P'_4) могут быть найдены решением следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$$-2\omega P'_1+\mu P'_2=0;$$

$$2\omega P'_1+(-\mu-\omega)P'_2+2\mu P'_3+\mu P'_4=0;$$

$$(1-\alpha)\omega P'_2-2\mu P'_3+\left[(1-\alpha)\omega+\frac{1}{\theta'}\right]P'_4=0;$$

$$\alpha\omega P'_2+\left[-\mu-(1-\alpha)\omega-\frac{1}{\theta'}\right]P'_4=0$$

с условием нормировки $\sum_{i=1}^{4} P_i=1$. Решение системы уравнений дает следующие результаты:

$$P'_1=\frac{1}{(1+\omega T_в)^2+\theta\omega^2\dfrac{T_в^2}{T_п}};$$

$$P'_2=\frac{2\omega T_в}{(1+\omega T_в)^2+\theta\omega^2\dfrac{T_в^2}{T_п}};$$

$$P'_3=\frac{(\omega T_в)^2-\theta\omega^2\dfrac{T_в^2}{T_п}}{(1-\omega T_в)^2+\theta\omega^2\dfrac{T_в^2}{T_п}};$$

$$P'_4=\frac{2\theta\omega^2\dfrac{T_в^2}{T_п}}{(1+\omega T_в)^2+\theta\omega^2\dfrac{T_в^2}{T_п}},$$

где $T_п = T_в + \theta/\alpha$ и θ определяются из (1.11). При $\omega \ll 1/\theta'$ $\theta \approx \theta'$. Очевидно,

$$K_{г\,(УК)} = P'_1 + P'_2; \quad K_{п\,(УК)} = P'_3 + P'_4. \tag{1.14}$$

Вероятность P'_4 характеризует вероятность состояния УК, при котором будет иметь место «ложное обслуживание» вызовов.

Для случая параллельной работы двух УУ при взаимном резервировании ФБ следует коэффициенты готовности отдельных ФБ ($K_{г(ФБ)i}$), вычисленные по формуле (1.14), перемножить.

Поочередная работа двух УУ при комбинированном контроле. В этом случае из девяти состояний (см. табл. 1.1) в одно можно объединить *2* и *4*, а также *6* и *8* состояния, поскольку, если одно (любое) УУ заблокировано, второе принимает на себя его нагрузку. При этом, если второе УУ неработоспособно, но не заблокировано, будет иметь место ложное обслуживание вызовов. Для упрощения задачи объединим состояния *3* и *6*. Таким образом, УК будет находиться в состояниях, показанных в табл. 1.2.

Таблица 1.2

№ состояния УК	Состояние $УУ_1$	Состояние $УУ_2$	№ состояния УК	Состояние $УУ_1$	Состояние $УУ_2$
1'	*р*	*р*	*4'*	*з*	*з*
2'	*р (з)*	*з (р)*	*5'*	*з (н)*	*н (з)*
3', 6'	*р (н)*	*н (р)*	*7'*	*н*	*н*

Обозначим вероятности этих состояний соответственно через P'_1, P'_2, $P'_{3,6}$, P'_4, P'_5 и P'_7. Так как отказы и восстановления обоих УУ независимы, то вероятности состояний можно рассчитать из следующих выражений:

$$P'_1 = P_1^2; \quad P'_2 = 2P_1P_2; \quad P'_{3,6} = 2P_1P_3;$$
$$P'_4 = P_2^2; \quad P'_5 = 2P_2P_3; \quad P'_7 = P_3^2,$$

в которых P_1, P_2 и P_3 могут быть получены из (1.7)—(1.11), т. е.

$$\left.\begin{aligned} P'_1 &= 1/(1+\omega T_п)^2; \\ P'_2 &= 2\omega T_в/(1+\omega T_п)^2; \\ P'_{3,6} &= 2\omega\theta/(1+\omega T_п)^2; \\ P'_4 &= (\omega T_в)^2/(1+\omega T_п)^2; \\ P'_5 &= 2\omega T_в \omega\theta/(1+\omega T_п)^2; \\ P'_7 &= (\omega\theta)^2/(1+\omega T_п)^2, \end{aligned}\right\} \tag{1.15}$$

где $T_п$ и θ определяются из (1.10) и (1.11). Учитывая, что при решении задач объединили состояния *3* и *6*, коэффициенты готовности и простоя УУ выразятся соответственно

$$\left.\begin{aligned} K_{г\,(УУ)} &= P'_1 + P'_2 + \frac{1}{2} P'_{3,6} = \frac{1 + 2\omega T_в + \omega\theta}{(1+\omega T_п)^2}; \\ K_{п\,(УУ)} &= \frac{1}{2} P'_{3,6} + P'_4 + P'_5 + P'_7 = \frac{\omega\theta + (\omega T_п)^2}{(1+\omega T_п)^2}. \end{aligned}\right\} \quad (1.16)$$

Вероятность состояния, при котором имеет место «ложное обслуживание» вызовов, определится суммой: $(P'_{3,6}/2) + (P'_5/2) + P'_7$. Для случая поочередной работы двух УУ при взаимном резервировании ФБ следует коэффициенты готовности отдельных ФБ ($K_{г\,(ФБ)\,i}$), вычисленные по (1.16), перемножить.

Для многомашинного УК при комбинированном контроле число состояний комплекса увеличивается. Задача может быть решена аналогично задаче при поочередной работе двух УУ. Вероятность состояния, при котором из s управляющих устройств $s—l—m$ работоспособно, l неработоспособно и заблокировано, а m неработоспособно и незаблокировано, может быть определена как

$$P_{l,m} = \frac{s!}{(s-l-m)!\, l!\, m!} P^{s-l-m} P_2^l P_3^m,$$

где P_1, P_2 и P_3 определяются из (1.7)—(1.11).

При многопроцессорном построении УК непрерывным контролем практически обнаруживаются все 100% отказов.

1.5. Дублирование функциональных блоков при нагруженном резерве и комбинированном контроле

Имеются основной ФБ (устройство) и резервный, которые работают в одинаковом режиме. Параметр потока отказов и интенсивность восстановления основного и резервного блоков соответственно равны ω и μ. Контроль блоков — комбинированный, т. е. часть отказов с параметром потока $(1—\alpha)\omega$ обнаруживается непрерывным контролем, а другая часть отказов с параметром потока $\alpha\omega$ — периодическим контролем со случайным периодом, имеющим произвольный закон распределения и среднее значение τ. Средняя длительность промежутка времени от произвольного момента до ближайшей проверки θ' определяется из (1.5). При обнаружении отказа системой контроля отказавший блок немедленно блокируется. Если отказал основной блок, он замещается незаблокированным резервным.

Таким образом, основной и резервный ФБ из девяти состояний, аналогичных указанным в табл. 1.1, могут находиться только в семи состояниях (см. табл. 1.3). Это объясняется тем, что состояния (см. табл. 1.1) *4* и *6* невозможны, так как если основной ФБ блокируется, т. е. системой контроля обнаруживается его отказ,

Таблица 1.3

№ состояния ФБ	Состояние основного ФБ	Состояние резервного ФБ	№ состояния ФБ	Состояние основного ФБ	Состояние резервного ФБ
1′	р	р	5′	н	з
2′	р	з	6′	н	р
3′	р	н	7′	н	н
4′	з	з			

он мгновенно замещается резервным незаблокированным ФБ (работоспособным или неработоспособным).

Если объединить состояния 3′ и 6′, обозначив $P'_{3,6}=P'_3+P'_6$, то приходим к табл. 1.2 и к задаче, рассмотренной в предыдущем параграфе (случай поочередной работы двух УУ при комбинированном контроле). Поэтому вероятности состояний P'_1, P'_2, $P'_{3,6}$, P'_4, P'_5 и P'_7 можно определить из (1.15).

Для определения вероятностей P'_3 и P'_6 в отдельности рассмотрим возможные переходы из перечисленных в табл. 1.3 состояний в состояние 6 и из этого состояния в другие. Граф таких перехо-

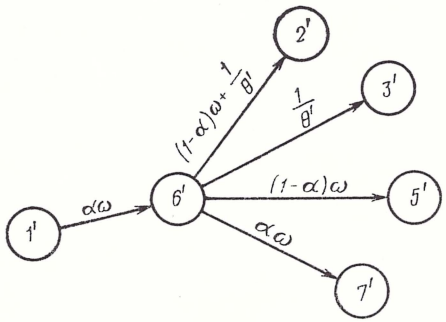

Рис. 1.7

дов показан на рис. 1.7. Уравнение равновесия для этого состояния будет иметь вид

$$\alpha\omega P'_1+\left[-2\omega+\alpha\omega-\frac{2}{\theta'}\right]P'_6=0,$$

откуда можно определить

$$P'_6=\frac{1}{(1+\omega T_{\text{п}})^2}\,\frac{\alpha\omega}{2\omega-\alpha\omega+\dfrac{2}{\theta'}}.$$

Далее, зная $P'_{3,6}$ и P'_6, определяем

$$P'_3 = P'_{3,6} - P'_6 = \frac{\omega\theta}{(1+\omega T_п)^2}\left[1 + \frac{\omega + \frac{1}{\theta'}}{2\omega - \alpha\omega + \frac{2}{\theta'}}\right].$$

Очевидно,

$$K_{г\,(ФБ)} = P'_1 + P'_2 + P'_3; \quad K_{п\,(ФБ)} = P'_4 + P'_5 + P'_6 + P'_7.$$

Вероятность состояния, при котором возможно «ложное обслуживание», можно определить, суммируя P'_5, P'_6 и P'_7.

1.6. Обеспечение надежности оборудования каналов и трактов

Надежность оборудования каналов и трактов, так же как и УУ, обеспечивается улучшением их безотказности и ремонтопригодности. В первом случае применяются такие методы резервирования оборудования, как создание запаса съемных блоков и плат, которыми могут быть замещены вручную отказавшие блоки и платы (скользящее ненагруженное резервирование); замена отказавших трактов резервными (секционное резервирование), которая может осуществляться как вручную (например, линейный тракт кабельной магистрали), так и автоматически (например, ствол РРЛ); автоматическое нагруженное резервирование наиболее ответственных узлов (например, генераторное оборудование) и т. п. Во втором случае применяются различные способы контроля: непрерывный (например, сигнализация перегорания предохранителей, автоматический контроль линейного тракта кабельной магистрали при помощи контрольных частот, ствола РРЛ при помощи пилот-сигнала и т. п.) и периодический (например, автоматический контроль групповых трактов при помощи контрольных частот, периодические проверки и измерения каналов и трактов и т. д.).

1.7. Надежность индивидуального оборудования каналов

К индивидуальному оборудованию каналов связи относятся блоки индивидуального преобразования (БИП). Они имеют врубную конструкцию и при отказах могут легко и быстро заменяться. Эти блоки объединяются в 12-канальные группы, в пределах которых они невзаимозаменяемы. Однако блоки разных групп, имеющие одинаковые номера, — взаимозаменяемы. Следовательно, наиболее простым и реальным способом повышения надежности индивидуального оборудования каналов является скользящее ненагруженное резервирование с восстановлением. Минимальный резерв БИП равен комплекту из 12 невзаимозаменяемых блоков. При обнаружении отказа основного блока он вручную заменяет-

ся резервным, а отказавший основной восстанавливается и остается на месте резервного.

Простой канала будет иметь место, если в момент отказа БИП не окажется резервного блока. Кроме того, кратковременный перерыв связи (простой) может иметь место и при наличии резервного блока (от момента отказа и до момента замены отказавшего блока), так как на обнаружение отказа и замену отказавшего блока вручную требуется некоторое время. Схема такого резервирования показана на рис. 1.8. Постановка задачи оценки надежности БИП имеет следующий вид. Имеется N основных и $N_{рез}$ резервных групп из M невзаимозаменяемых блоков. Параметр потока отказов и интенсивность восстановления каждого из M $(N + N_{рез})$ блоков соответственно ω и μ. Резерв ненагруженный, поэтому считаем, что резервные блоки не отказывают. Требуется определить коэффициент простоя фиксированного блока.

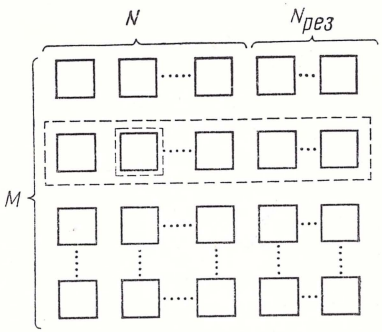

Рис. 1.8

Решим эту задачу для случая неограниченного восстановления, т. е. случая, когда число ремонтников таково, что практически любой отказавший блок немедленно начинает ремонтироваться. Поэтому достаточно рассмотреть только блоки (основные и резервные) одного номера канала (на рис. 1.8 обведены пунктиром). В этом случае состояния системы могут быть описаны марковским

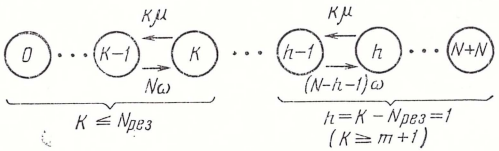

Рис. 1.9

процессом. Граф переходов показан на рис. 1.9. Стационарные вероятности состояний системы могут быть найдены решением следующей системы линейных алгебраических уравнений:

$N\omega P_{k-1} - k\mu P_k = 0$ при $k = 1, 2, \ldots, N_{рез}$;

$(N - h + 1)\omega P_{h-1} - (h + N_{рез})\mu P_h = 0$ при $h = k - N_{рез} = 1, 2, \ldots, N$

при условии нормировки $\sum_{i=0}^{N} P_i = 1$. Решение этих уравнений имеет вид

$$\left.\begin{aligned} P_k &= \frac{N^k}{k!}\left(\frac{\omega}{\mu}\right)^k P_0 \quad \text{при} \quad k = 0,1,2,\ldots, N_{рез}; \\ P_h &= \frac{N!\, N^{N_{рез}}}{(N-h)!\,(h+N_{рез})!}\left(\frac{\omega}{\mu}\right)^{N_{рез}+h} P_0 \quad \text{при} \quad h = 1,2,\ldots,N. \end{aligned}\right\} \qquad (1.17)$$

Из условия нормировки определяем

$$P_0=\left[\sum_{k=0}^{N_{\text{рез}}}\frac{N^k}{k!}\left(\frac{\omega}{\mu}\right)^k+\sum_{h=1}^{N}\frac{N!\,N_{\text{рез}}}{(N-h)!\,(h+N_{\text{рез}})!}\left(\frac{\omega}{\mu}\right)^{N_{\text{рез}}+h}\right]^{-1}.$$

Простой фиксированного блока возможен при условии, что число отказавших основных блоков превышает число резервных, т. е. имеются отказавшие основные блоки, не замененные резервными, и среди этих незамененных находится фиксированный блок, т. е.

$$K_{\text{п.ф}}=\sum_{k=N_{\text{рез}}+1}^{N+N_{\text{рез}}}P_k\frac{k-N_{\text{рез}}}{N}. \tag{1.18}$$

Подставляя в (1.18) значение (1.17), получим

$$K_{\text{п.ф}}=\sum_{h=1}^{N}\frac{\dfrac{h\,N!\,N^{N_{\text{рез}}-1}}{(N-h)!\,(h+N_{\text{рез}})!}\left(\dfrac{\omega}{\mu}\right)^{N_{\text{рез}}+h}}{\displaystyle\sum_{k=0}^{N_{\text{рез}}}\frac{N^k}{k!}\left(\frac{\omega}{\mu}\right)^k+\sum_{s=1}^{N}\frac{N!\,N^{N_{\text{рез}}}}{(N-s)!\,(s+N_{\text{рез}})!}\left(\frac{\omega}{\mu}\right)^{N_{\text{рез}}+s}}.$$

Для случая, когда $N_{\text{рез}}=1$,

$$K_{\text{п.ф}}=\sum_{h=1}^{N}\frac{\dfrac{h\,N!}{(N-h)!\,(h+1)!}\left(\dfrac{\omega}{\mu}\right)^{h+1}}{1+\dfrac{N^2}{N+1}\left[\left(1-\dfrac{\omega}{\mu}\right)^{N+1}-1\right]}. \tag{1.19}$$

Если $N\omega/\mu$ мало, то знаменатель в последней формуле равен примерно 1; слагаемые для $h\geqslant 2$ малы, и поэтому $K_{\text{п}}\approx\frac{N}{2}\left(\frac{\omega}{\mu}\right)^2$.

Если переключение на резервный блок происходит не мгновенно, а в среднем в течение времени $\bar{t}_{\text{р}}$ (переключение производится вручную), то

$$K'_{\text{п.ф}}=K_{\text{п.ф}}+\omega\bar{t}_{\text{р}}P\{D\}, \tag{1.20}$$

где D — событие, заключающееся в том, что резервные блоки имеются:

$$P\{D\}=\sum_{k=0}^{N_{\text{рез}}-1}P_k=\frac{\displaystyle\sum_{k=0}^{N_{\text{рез}}-1}\frac{N^k}{k!}\left(\frac{\omega}{\mu}\right)^k}{\displaystyle\sum_{k=0}^{N_{\text{рез}}}\frac{N^k}{k!}\left(\frac{\omega}{\mu}\right)^k+\sum_{s=1}^{N}\frac{N!\,N^{N_{\text{рез}}}}{(N-s)!\,(s+N_{\text{рез}})!}\left(\frac{\omega}{\mu}\right)^{N_{\text{рез}}+s}}. \tag{1.21}$$

Для случая, когда все $M(N+N_{рез})$ блоков обслуживаются ограниченным числом ремонтников r, расчет коэффициента простоя можно выполнять по следующей приближенной методике. Введем обозначения: H_s — событие, заключающееся в том, что в группе основных блоков данного номера канала имеется s находящихся на ремонте, но незамещенных резервных блоков, где $s=0, 1, 2,..., N$; $z=N+N_{рез}$; B_k — событие, заключающееся в том, что среди MN основных блоков имеется k неработоспособных. Тогда

$$K_{п.ф}=\sum_{s=1}^{N} P\{H_s\}\, s/N;$$

$$P\{H_s\}=\sum_{k=N_{рез}+s}^{Mz-N+s} P\{B_k\}\, P\{H_s/B_k\};$$

$$P\{H_s/B_k\}=\frac{C_z^{N_{рез}+s}\, C_{(M-1)\,z}^{k-N_{рез}-s}}{C_{Mz}^{k}}.$$

Для упрощения дальнейших расчетов будем приближенно считать, что поток отказов блоков не зависит от числа отказавших блоков и имеет параметр потока отказов $MN\omega$. Тогда для расчета $P\{B_k\}$ можно применить формулу Эрланга [12]:

$$P\{B_k\}=\frac{\frac{1}{k!}\left(\frac{MN\omega}{\mu}\right)^k}{\sum_{i=0}^{r}\frac{1}{i!}\left(\frac{MN\omega}{\mu}\right)^i+\frac{1}{r!}\sum_{i=r+1}^{\infty}\frac{1}{r^{i-r}}\left(\frac{MN\omega}{\mu}\right)^i} \quad \text{при } k\leqslant r; \quad (1.22)$$

$$P\{B_k\}=\frac{1/r!\, r^{k-r}\,(MN\omega/\mu)^k}{\sum_{i=0}^{r}\frac{1}{i!}\left(\frac{MN\omega}{\mu}\right)^i+\frac{1}{r!}\sum_{i=r+1}^{\infty}\frac{1}{r^{i-r}}\left(\frac{MN\omega}{\mu}\right)^i} \quad \text{при } k>r. \quad (1.23)$$

Если положить $N_{рез}=1$, $r=1$ и пренебречь вероятностью одновременного нахождения на ремонте более двух блоков, то формула для расчета $K_{п.ф}$ принимает следующий вид:

$$K_{п.ф}\approx\frac{1/N\,(N\omega/\mu)^2}{\sum_{i=0}^{2}(NM\omega/\mu)^i}.$$

При ручной замене отказавших блоков резервными расчет коэффициента простоя осуществляется по (1.20), где

$$P\{D\}=\sum_{k=0}^{(M-1)z+N_{рез}-1} P\{B_k\}\, P\{D/B_k\};$$

$$P\{D/B_k\}=\sum_{i=0}^{N_{рез}-1} C_z^i\, C_{(M-1)\,z}^{k-i}/C_{Mz}^{k}.$$

Для улучшения ремонтопригодности индивидуального оборудования каналов применяют контроль различных видов и сигнализацию. Предположим, что часть $(1-\alpha)$ отказов БИП с параметром потока отказов $(1-\alpha)\omega$ может быть обнаружена непрерывным контролем (например, перегорание предохранителей). Контрольные частоты для контроля состояния каналов не используются, однако при ручном и полуавтоматическом способах установления междугородного соединения телефонистка фактически контролирует работоспособность канала, прежде чем его предоставить абоненту (рабочий контроль). Поэтому можно считать, что в этом случае индивидуальное оборудование канала охвачено периодическим контролем со случайным периодом контроля. Автоматическим рабочим контролем каналы могут быть охвачены и на перспективных междугородных коммутационных узлах и станциях. Предположим, что при помощи такого контроля можно обнаружить другую часть отказов с параметром потока $\alpha\omega$.

Остановимся несколько подробнее на рабочем контроле канала. Постановка задачи имеет следующий вид. Имеется n незаблокированных каналов. Интенсивность поступающей на них телефонной нагрузки λ, длительность телефонного занятия $1/\nu$. Отказ такого канала может быть обнаружен только после поступления следующего вызова. При этом, если отказал занятый канал, то он мгновенно освобождается. Промежуток времени от момента отказа канала до поступления следующего вызова представляет собою случайную величину, среднее значение которой следует найти. Просеянный поток, поступающий на фиксированный канал, приближенно можно считать простейшим. Поэтому среднее значение промежутка времени от момента возникновения отказа до поступления следующего вызова θ будет равно среднему промежутку времени между моментами освобождения канала и его занятия следующим вызовом, т. е. $\theta=n/\lambda-1/\nu$, а среднее время простоя для рассматриваемого случая будет определяться из формулы

$$T_{\text{п}}=T_{\text{в}}+\alpha\left(\frac{n}{\lambda}-\frac{1}{\nu}\right),$$

откуда значение $\mu=1/T_{\text{в}}+\alpha\left(\frac{n}{\lambda}+\frac{1}{\nu}\right)$ должно быть подставлено в (1.19), (1.21), (1.22) и (1.23). Если рабочий контроль отсутствует, то доля отказов (α), которая не может быть обнаружена непрерывным контролем, выявляется при периодических (например, ежедневных) проверках каналов обслуживающим персоналом. В этом случае при условии $\omega \ll \mu$ приближенно можем считать [13] $T_{\text{п}} \approx T_{\text{в}}+\alpha(T_k/2)$, где T_k — постоянный период контроля каналов.

1.8. Надежность оборудования групповых трактов

Групповое оборудование каждой группы каналов содержит несколько врубных панелей. Так, для каждой 12-канальной первичной группы предусматриваются панель передачи первичной груп-

пы (ППГ) и панель приема первичной группы (ППрПГ). Кроме того, для третьей первичной группы предусматривается панель заграждающего фильтра ЗФ-104,14.

Первичные группы объединяются в 60-канальные вторичные группы. В пределах 60-канальной группы панели передачи и приема невзаимозаменяемы. Однако соответствующие панели разных 60-канальных групп взаимозаменяемы. Следовательно, минимальный резервный комплект оборудования первичного преобразования должен включить в себя одиннадцать панелей: пять ППГ 1—5, пять ППрПГ 1—5, панель ЗФ-104,14. Для каждой 60-канальной вторичной группы предусматриваются: панель усилителей передачи вторичной группы ПУС 312—552, панель передачи вторичной группы ППВГ и панель приема вторичной группы ППрВГ. Вторичные группы объединяются в 300- и 180-канальные группы. В пределах объединенной 480-канальной группы панели передачи и панели приема вторичных групп невзаимозаменяемы, усилители ПУС 312—552 взаимозаменяемы. Таким образом, минимальный резервный комплект оборудования вторичного преобразования может быть скомплектован из 17 панелей (восемь панелей ППВГ 1—8, восемь панелей ППрВГ 1—8 и одна панель ПУС 312—552). Аналогично могут быть рассмотрены третичные тракты и т. д.

Схема резервирования для рассматриваемых случаев показана на рис. 1.10. Постановка задачи в основном аналогична случаю индивидуального оборудования. Отличие заключается в том, что

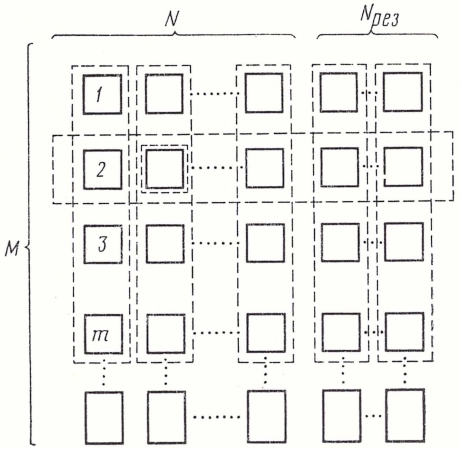

Рис. 1.10

каждый комплект группового преобразовательного оборудования состоит из m панелей. Отказ каждой панели приводит к отказу всего комплекта группового оборудования. Для его восстановления отказавшую панель заменяют соответствующей из резервного комплекта. Остальные панели резервного комплекта также можно использовать для замены соответствующих отказавших панелей в основных комплектах.

Для случая неограниченного восстановления коэффициент простоя оборудования фиксированной группы вычисляется по формуле

$$K_{\text{п.ф.г}} = 1 - \prod_{i=1}^{m} (1 - K_{\text{п.ф}i}),$$

где $K_{\text{п.ф}i}$ рассчитывается по (1.19) для каждой панели.

При ручной замене панели коэффициент простоя оборудования фиксированной группы вычисляется по (1.20), где ω будет иметь смысл параметра потока отказов всего оборудования фиксированной группы, т. е. всех m панелей. При ограниченном восстановлении и $N_{\text{рез}}=1$ задача приближенно может быть решена следующим образом:

$$K_{\text{п.ф.г}} = \sum_{l=1}^{m} \left[1 - \left(\frac{N-1}{N}\right)^{l}\right] P\{A_l\},$$

где A_l — событие, заключающееся в том, что среди m групп одноименных панелей из N взаимозаменяемых комплектов группового оборудования l групп находятся в состоянии, при котором в каждой группе, состоящей из N одноименных панелей, количество отказавших панелей больше $N_{\text{рез}}=1$. При этом

$$P\{A_l\} = \sum_{k=2l}^{N} P\{B_k\} P\{A_l/B_k\},$$

где $P\{B_k\}$ определяется по (1.22) и (1.23). Предполагаем, что вероятность того, что $l>2$, пренебрежимо мала, т. е. $l=1, 2$. Тогда

$$P\{A_1/B_k\} = C_k^2 \frac{1}{M^2} \frac{1}{m} \quad \text{при} \quad k \leqslant 3;$$

$$P\{A_1/B_k\} = C_k^2 \frac{1}{M^2} \frac{1}{m} \left(1 - \frac{1}{M(Mm-1)}\right) \quad \text{при} \quad k>3;$$

$$P\{A_2/B_k\} = C_k^4 \frac{1}{M^2} \frac{1}{m} \frac{1}{M(Mm-1)} \quad \text{при} \quad k>3.$$

Оборудование групповых трактов охвачено непрерывным контролем (например, сигнализация перегорания предохранителей), который обнаруживает часть отказов с параметром потока $(1-\alpha)\omega$, и периодическим контролем (система АРУ), который обнаруживает остальные отказы с параметром потока $\alpha\omega$. При этом период контроля будет случайным, поскольку на трактах, находящихся не в норме, система контроля будет задерживаться для осуществления регулировки усиления. Среднее время простоя оборудования группового тракта в этом случае может быть вычислено из выражения

$$T_{\text{п}} \approx T_{\text{в}} + \alpha\theta, \tag{1.24}$$

где θ определяется из (1.5). Если предположить, что система АРУ не может выявить все оставшиеся отказы, а часть из них с

параметром потока отказов $\varepsilon\omega$ может быть обнаружена только в момент профилактики, которая осуществляется через равные промежутки времени $T_к$, то приближенно можно считать, что

$$T_п \approx T_в + (\alpha - \varepsilon)\theta + \varepsilon \frac{T_к}{2}. \qquad (1.25)$$

Поэтому для учета влияния системы контроля на надежность оборудования групповых трактов в формулы для $K_п$ следует подставлять $\mu = 1/T_п$, где $T_п$ определяется по (1.24) или (1.25).

1.9. Надежность линейного тракта кабельной магистрали

Линейный тракт кабельной магистрали охвачен непрерывным контролем при помощи контрольных частот. Поэтому можно считать, что любой отказ оборудования линейного тракта будет немедленно обнаружен. Безотказность линейного тракта можно повысить методом посекционного нагруженного резервирования, когда в пределах секции между двумя обслуживаемыми усилительными пунктами, на которых имеется оборудование для переключения трактов, отказавший линейный тракт может быть заменен резервным. Обычно на несколько основных трактов берется один резервный. При этом для повышения использования оборудования по резервному тракту может работать система, применяемая для второстепенных связей.

Рассмотрим расчет коэффициента простоя фиксированного линейного тракта секции кабельной магистрали между двумя ОУП с переключением трактов (рис. 1.11) для двух случаев: 1) без ре-

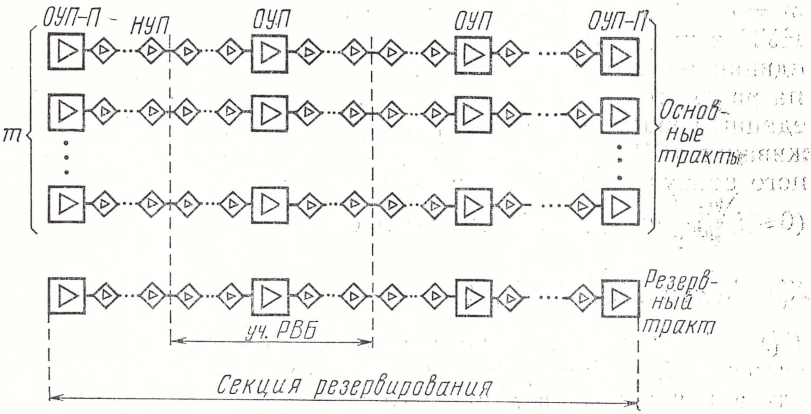

Рис. 1.11

зервирования и 2) при наличии одного резервного тракта. Введем следующие обозначения: $K_{г.оуп-п}$ — коэффициент готовности резервируемого оборудования линейного тракта ОУП с оборудованием для переключения трактов или оконечного пункта; $K_{г.оуп}$ — коэффициент готовности оборудования линейного тракта ОУП без обо-

рудования для переключения трактов; $K_{\text{г.нуп}}$ — коэффициент готовности оборудования линейного тракта НУП; $K_{\text{г.п.к}}$ — коэффициент готовности пары 1 км кабеля; $N_{\text{оуп}}$ — число ОУП без оборудования для переключения трактов в пределах секции; $N_{\text{нуп}}$ — число НУП на участке между соседними ОУП; l — длина кабеля (км) в пределах секции; m — число основных трактов, приходящихся на один резервный.

Тогда коэффициент готовности фиксированного участка линейного тракта кабельной магистрали без резервирования при неограниченном восстановлении выразится так:

$$K_{\text{г.ф.л.т}} = K_{\text{г.оуп-п}} K_{\text{г.оуп}}^{N_{\text{оуп}}} K_{\text{г.оуп}}^{N_{\text{нуп}}(N_{\text{оуп}}+1)} K_{\text{г.п.к}}^{l}$$

или $K_{\text{п.ф.л.т}} = 1 - K_{\text{г.ф.л.т}}$. При наличии одного резервного тракта на m рабочих

$$K_{\text{п.ф.л.т}} = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{m-i}{m} C_{m+1}^{i} K_{\text{г.ф.л.т}}^{i} K_{\text{п.ф.л.т}}^{m+1-i}.$$

Допустим, что на участке, обслуживаемом одной ремонтно-восстановительной бригадой (РВБ), только НУП имеют ограниченное восстановление. При этом необходимо иметь в виду, что в пределах секции резервирования может быть несколько участков, обслуживаемых разными РВБ (см. рис. 1.11). В состав двух крайних участков РВБ входят как часть рассматриваемой секции резервирования, так и части соседних.

Введем следующие обозначения событий: k_1 — число работоспособных трактов в пределах секции резервирования ($0 \leqslant k_1 \leqslant m'$, где $m' = m+1$); k_2 — число трактов с работоспособным оборудованием НУП в пределах секции резервирования ($0 \leqslant k_2 \leqslant m'$); i_0 — число единиц неработоспособного оборудования НУП во всех трактах на рассматриваемой секции ($0 \leqslant i_0 \leqslant m' N_{\text{нуп}}[N_{\text{оуп}}+1]$; i_1 — число единиц неработоспособного оборудования НУП на участке обслуживания РВБ ($0 \leqslant i_1 \leqslant m' N_{\text{нуп}}$); i_2 — число единиц неработоспособного оборудования НУП на половине участка обслуживания РВБ ($0 \leqslant i_2 \leqslant \frac{1}{2} m' N_{\text{нуп}}$). Кроме того, обозначим:

$$K_{\text{г}}' = K_{\text{г.оуп-п}} K_{\text{г.оуп}}^{N_{\text{оуп}}} K_{\text{г.п.к}}^{l};$$

$P\{x=i\}$ — вероятность того, что случайная величина x приняла значение i; $P\{(x=i)/(y=j)\}$ — условная вероятность того, что случайная величина x приняла значение i, если случайная величина y приняла значение j.

Как и для случая неограниченного восстановления, коэффициент простоя

$$K_{\text{п.ф.л.т}} = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{m-i}{m} P\{k_1 = i\},$$

где

$$P\{k_1=i\}=\sum_{j=1}^{m'}P\{k_2=j\}\,P\{(k_1=i)/(k_2=j)\};$$

$$P\{(k_1=i)/(k_2=j)\}=C_j^i\,K'^i_{\text{г}}\,(1-K'_{\text{г}})^{j-i};$$

$$P\{k_2=j\}=\sum_{i=m'-j}^{m'\,N_{\text{НУП}}\,(N_{\text{ОУП}}+1)}P\{i_0=i\}\,P\{(k_2=j)/(i_0=i)\}\qquad\text{при}\quad j=0,\,1,\,\ldots,\,m'-1.$$

Для нахождения вероятности $P\{(k_2=j)/(i_0=i)\}$ воспользуемся решением «задачи об ячейках» из [14][1], где показано, что вероятность того, что j из m' различных ячеек (в нашем случае трактов) окажутся пустыми (в нашем случае работоспособными) после размещения в них i различных объектов (в нашем случае неработоспособных НУП), можно определить из выражения

$$\frac{m'\,(m'-1)\ldots(j+1)}{(m')^i}\,S(i,\,m'-j)=P\{(k_2=j)/(i_0=i)\},$$

где $S(i,\,m'-j)$ — числа Стирлинга 2-го рода (см. приложение ПIV). Заметим при этом, что $i\leqslant m-1<N_{\text{НУП}}(N_{\text{ОУП}}+1)$.

Допустим, что на участках ремонта в пределах секции резервирования во всех m' трактах имеется следующее количество единиц неработоспособного оборудования НУП (рис. 1.12):

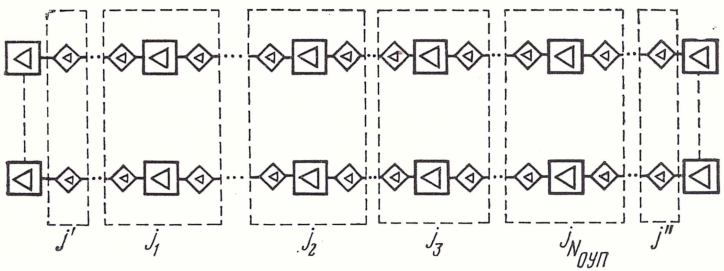

Рис. 1.12

на 1-м участке—j_1,
на 2-м участке—j_2,

. . . . . .

на $N_{\text{ОУП}}$-м участке—$j_{N_{\text{ОУП}}}$,
на крайних половинах участков соответственно—j' и j''. Вероятность этого события может быть записана как

$$P\{i_1=j_1\}\,P\{i_1=j_2\}\ldots P\{i_1=j_{N_{\text{ОУП}}}\}\,P\{i_2=j'\}\,P\{i_2=j''\}.$$

Событие $i_0=i$ есть сумма событий указанного вида при условиях

[1] Задача 2, с. 121.

$$\left.\begin{aligned} &j_1+j_2+\ldots+jN_{\text{ОУП}}+j'+j''=i;\\ &0\leqslant j_q\leqslant m'N_{\text{НУП}},\ \text{где}\quad q=1,2,\ldots,N_{\text{ОУП}};\\ &0\leqslant j'\leqslant\frac{1}{2}m'N_{\text{НУП}},\quad 0\leqslant j''\leqslant\frac{1}{2}m'N_{\text{НУП}}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.26)$$

Очевидно, слагаемые попарно несовместимы. Поэтому

$$P\{i_0=i\}=\sum P\{i_1=j_1\}P\{i_1=j_2\}\ldots P\{i_1=j_{N_{\text{ОУП}}}\}P\{i_2=j'\}P\{i_2=j''\},$$

где суммирование ведется при условиях (1.26). Для нахождения $P\{i_2=j'\}$ и $P\{i_2=j''\}$ принимаем гипотезы о количестве неработоспособного оборудования НУП на тех участках ремонта, которые относятся к ОУП с оборудованием для переключения трактов. Тогда

$$P\{i_2=j\}=\sum_{i=j}^{\frac{1}{2}m'N_{\text{НУП}}+j}P\{i_1=i\}P\{(i_2=j)/(i_1=i)\};$$

$$P\{(i_2=j)/(i_1=i)\}=C_i^j\frac{1}{2^i}.$$

Вероятность $P\{i_1=i\}$, т. е. вероятность того, что на данном участке ремонта имеется i единиц неработоспособного оборудования НУП (общее число оборудования НУП на участке ремонта $m'N_{\text{НУП}}$), находим из формулы процесса гибели и размножения [12]:

$$P\{i_1=i\}=\frac{\dfrac{1}{(m'N_{\text{НУП}}-i)!}\left(\dfrac{\mu_{\text{НУП}}}{\omega_{\text{НУП}}}\right)^{m'N_{\text{НУП}}-i}}{1+\sum\limits_{k=1}^{m'N_{\text{НУП}}}\dfrac{1}{k!}\left(\dfrac{\mu_{\text{НУП}}}{\omega_{\text{НУП}}}\right)^{k}},$$

где $\omega_{\text{НУП}}$ и $\mu_{\text{НУП}}$ — соответственно параметр потока отказов и интенсивность восстановления единицы оборудования НУП для одного тракта.

Коэффициент простоя фиксированного линейного тракта кабельной магистрали, содержащей R секций резервирования при ручном переключении на резервный тракт, может быть определен из выражения

$$K_{\text{п.ф.л.т}\,\Sigma}=1-K_{\text{г.ф.л.т}}^{R}\left(K'_{\text{г.оуп}}\right)^{R-1}K_{\text{г.э.оуп}}^{(R-1)N_{\text{ОУП}}}\times$$

$$\times K_{\text{г.э.ос}}^{2}K_{\text{г.к}}^{Rl}(1-\omega_{\text{р}}\bar{t}_{\text{р}}),$$

где $K'_{\text{г.оуп}}$ — коэффициент готовности нерезервируемых элементов линейного тракта ОУП с оборудованием для переключения трактов; $K_{\text{п.э. оуп}}$ и $K_{\text{п.э.ос}}$ — соответственно коэффициенты готовности оборудования электропитания ОУП и оконечной станции; $K_{\text{г.к}}$ —

коэффициент готовности 1 км кабеля в целом; $\omega_р$ — параметр потока отказов резервируемых элементов линейного тракта магистрали: $\bar{t}_р$ — среднее время переключения системы на резервный тракт.

Аналогичным образом можно составить методику для расчета фиксированного ствола радиорелейной линии при ограниченном восстановлении высокочастотного оборудования стволов. Однако из-за громоздких выкладок и ограниченного объема книги эта методика здесь не приводится.

Глава 2 ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ТЕЛЕФОННЫХ ВЫЗОВОВ С УЧЕТОМ НЕНАДЕЖНОСТИ И СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ ПРИБОРОВ КОММУТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

2.1. Общие соображения

В [1] приведены методы расчета среднего значения телефонных потерь с учетом ненадежности оборудования для различных коммутационных систем. При этом предполагалось, что контроль работоспособности оборудования осуществляется непрерывно. Однако как на эксплуатируемых в настоящее время коммутационных узлах и станциях с децентрализованным управлением, так и на перспективных коммутационных узлах и станциях с централизованным управлением 100%-ный непрерывный контроль оборудования практически не может быть обеспечен. Определенное количество отказов оборудования выявляется на существующих узлах и станциях только при периодических профилактических проверках оборудования, а на перспективных коммутационных узлах и станциях будет выявляться путем периодического программного контроля. Это обстоятельство обусловливает случаи использования при установлении соединения неработоспособного оборудования («ложное обслуживание»), что приводит к потерям вызовов. Поэтому методы расчета, приводимые в [1], могут быть использованы в перечисленных случаях для ориентировочной оценки телефонных потерь, если усреднить время восстановления с учетом периодичности контроля.

Для оценки качества обслуживания вызовов большое значение будет иметь не только сама величина потерь, но и длительность аварийных ситуаций. Поэтому оценивать качество обслуживания вызовов на таких коммутационных узлах и станциях только средней величиной телефонных потерь недостаточно. Показателями, более полно оценивающими качество обслуживания вызовов на перспективных узлах и станциях, могут быть [15]:

распределение телефонных потерь во времени, когда для каждого значения величины потерь p в течение времени T фиксируется суммарная длительность частичных интервалов, на которых телефонные потери больше или равны p;

набор распределений средних t-минутных потерь;

набор β-процентных квантилей телефонных потерь, где для каждого β (где β — доверительная вероятность) берется такое значение p, при котором вероятность того, что средняя t-минутная величина потерь будет меньше p, равна β.

Расчет перечисленных показателей весьма сложен и поэтому должен быть предметом дальнейших исследований. На данном же этапе можно предложить более простые показатели, учитывающие приведенные выше соображения. К таким показателям, наряду со средним значением телефонных потерь, можно отнести телефонные потери для направления определенного вида связи за время простоя и среднюю длительность одного простоя из-за отказов оборудования узла (станции), участвующего в установлении соединений. Оценка этих показателей представляет интерес в основном в ситуациях, когда отказало групповое или централизованное оборудование, так как в этих случаях становятся неработоспособными либо большая группа приборов (линий) направления или вида связи, когда телефонные потери резко возрастают, либо все приборы (линии) направления, вида связи или станции (узла), когда телефонные потери достигают 100%.

2.2. Расчет показателей качества обслуживания вызовов в полнодоступной группе приборов коммутационной системы с учетом ненадежности и способов контроля работоспособности приборов

Постановка задачи для случая периодического контроля. Рассматривается полнодоступная группа из n приборов коммутационной системы, на которую поступают три простейших потока: поток телефонных вызовов с интенсивностью λ, поток отказов с параметром потока для каждого прибора ω и поток восстановлений приборов с интенсивностью μ. Отказ приборов может быть обнаружен только в момент контроля, который осуществляется периодически. После обнаружения отказа прибор блокируется и начинается его восстановление. С момента отказа и до его обнаружения периодическим контролем отказавший прибор остается незаблокированным и может быть использован для обслуживания вызовов (ложное обслуживание).

Таким образом, каждый прибор может находиться в одном из трех состояний: работоспособном; неработоспособном и заблокированном; неработоспособном и незаблокированном. При этом длительности занятия работоспособного и неработоспособного, но незаблокированного прибора будут различными и имеют экспоненциальное распределение с параметрами соответственно ν_1 и ν_2. Иными словами, «производительность» работоспособных и нера-

ботоспособных, но незаблокированных приборов будет различна.

В рассматриваемой группе приборов могут иметь место следующие виды телефонных потерь:

из-за отсутствия свободных незаблокированных приборов $p_з$;

из-за попадания вызовов на неработоспособные, но незаблокированные приборы («ложное обслуживание») $p_л$;

из-за прекращения обслуживания вызова вследствие отказа обслуживающего прибора (недообслуживание) $p_н$.

Таким образом, вероятность телефонных потерь в системе будет складываться из перечисленных трех составляющих:

$$p = p_з + p_л + p_н. \tag{2.1}$$

Рассмотрим расчет показателей качества обслуживания вызовов для двух случаев:

1) когда период контроля постоянный и все приборы контролируются одновременно;

2) когда период контроля случайный и приборы контролируются в разные (независимые) моменты времени.

Контроль с постоянным периодом. Обозначим период контроля через τ, а вероятности того, что через промежуток времени t после момента контроля прибор будет соответственно: работоспособен — $P_1(t)$; неработоспособен и заблокирован — $P_2(t)$; неработоспособен, но не заблокирован — $P_3(t)$. Эти вероятности могут быть определены по (1.2)—(1.4). Введем следующие обозначения: $B_{l,m}(t)$ — событие, заключающееся в том, что через промежуток времени t после момента контроля $n—l—m$ приборов находятся в первом состоянии, l приборов — во втором состоянии и m приборов — в третьем состоянии, где $l=0, 1, 2, ..., n$; $m=0, 1, 2, ..., n—l$; $B_{l,m}$ — то же событие, взятое в произвольный момент времени; $P\{з/B_{l,m}\}$ — условная вероятность телефонных потерь из-за отсутствия свободных незаблокированных приборов при условии, что имеет место событие $B_{l,m}$; $P\{л/B_{l,m}\}$ — условная вероятность телефонных потерь вследствие ложного обслуживания при условии, что имеет место событие $B_{l,m}$; $V_{s,q}$ — событие, заключающееся в том, что обслуживанием заняты s приборов, среди которых q приборов неработоспособны; $P\{V_{s,q}/B_{l,m}\}$ — условная вероятность события $V_{s,q}$ при условии, что имеет место событие $B_{l,m}$.

Из формулы полиномиального распределения получаем

$$P\{B_{l,m}(t)\} = \frac{n!}{l!\,m!\,(n-l-m)!}\,[P_1(t)]^{n-l-m}\,[P_2(t)]^l\,[P_3(t)]^m.$$

Кроме того,

$$P\{B_{l,m}\} = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau P\{B_{l,m}(t)\}\,dt =$$

$$= \frac{1}{\tau}\,\frac{n!}{l!\,m!\,(n-l-m)!}\int_0^\tau [P_1(t)]^{n-l-m}\,[P_2(t)]^l\,[P_3(t)]^m\,dt; \tag{2.2}$$

$$p_з = \sum_{l=0}^{n} \sum_{m=0}^{n-l} P\{B_{l,m}\} P\{з/B_{l,m}\}, \tag{2.3}$$

где $P\{з/B_{n,0}\} = 1$;

$$p_л = \sum_{l=0}^{n-1} \sum_{m=1}^{n-l} P\{B_{l,m}\} P\{л/B_{l,m}\}. \tag{2.4}$$

Учитывая, что работоспособные и неработоспособные, но незаблокированные приборы будут иметь разную производительность, т. е. длительность их занятия различная, для нахождения вероятности $P\{V_{s,q}/B_{l,m}\}$ используем формулу (П.I.6), приведенную в приложении П.I, изменив обозначения применительно к нашему случаю. При этом следует иметь в виду, что при наличии события $B_{l,m}$ число способов выбора $s-q$ работоспособных и q неработоспособных приборов равно $C^q_m C^{s-q}_{n-l-m}$, где $0 \leqslant q \leqslant m$, $q \leqslant s \leqslant n-l-m+q$. Тогда

$$P\{V_{s,q}/B_{l,m}\} = \frac{C^q_m\, C^{s-q}_{n-l-m} (n-l-s)!\, \rho_1^{s-q} \rho_2^q}{\sum\limits_{q'=0}^{m} \sum\limits_{s'=q'}^{n-l-m+q'} C^{q'}_m\, C^{s'-q'}_{n-l-m} (n-l-s')\, \rho_1^{s'-q'} \rho_2^{q'}}, \tag{2.5}$$

где $\rho_1 = \lambda/\nu_1$; $\rho_2 = \lambda/\nu_2$. Учитывая, что

$$P\{з/B_{l,m}\} = P\{V_{n-l-m}/B_{l,m}\},$$

получим

$$P\{з/B_{l,m}\} = \frac{\rho_1^{n-l-m} \rho_2^m}{\sum\limits_{q=0}^{m} \sum\limits_{s=q}^{n-l-m+q} C^q_m\, C^{s-q}_{n-l-m} (n-l-s)!\, \rho_1^{s-q} \rho_2^q}. \tag{2.6}$$

Для упрощения заменим в (2.5) и (2.6) знаменатель интегралом

$$\sum_{q=0}^{m} \sum_{s=q}^{n-l-m+q} C^q_m\, C^{s-q}_{n-l-m} (n-l-s)!\, \rho_1^{s-q} \rho_2^q =$$

$$= \int_0^\infty e^{-x} (x+\rho_1)^{n-l-m} (x+\rho_2)^m\, dx. \tag{2.7}$$

Тогда

$$P\{V_{s,q}/B_{l,m}\} = \frac{C^q_m\, C^{s-q}_{n-l-m} (n-l-s)!\, \rho_1^{s-q} \rho_2^q}{\int\limits_0^\infty e^{-x} (x+\rho_1)^{n-l-m} (x+\rho_2)^m\, dx},$$

$$P\{з/B_{l,m}\} = \frac{\rho_1^{n-l-m} \rho_2^m}{\int\limits_0^\infty e^{-x} (x+\rho_1)^{n-l-m} (x+\rho_2)^m\, dx}. \tag{2.8}$$

Из (2.2), (2.3) и (2.8) можно найти вероятность телефонных потерь при отсутствии свободных незаблокированных приборов:

$$p_3 = \sum_{l=0}^{n-1} \sum_{m=0}^{n-l} \frac{n!\, \rho_1^{n-l-m}\, \rho_2^m \int_0^\tau [P_1(t)]^{n-l-m}\, [P_2(t)]^l\, [P_3(t)]^m\, dt}{\tau l!\, m!\, (n-l-m)! \int_0^\infty e^{-x} (x+\rho_1)^{n-l-m} (x+\rho_2)^m\, dx} +$$

$$+ \frac{1}{\tau} \int_0^\tau [P_2(t)]^n\, dt. \qquad (2.9)$$

Для определения вероятности телефонных потерь из-за «ложного обслуживания» обозначим через $\Omega_{l,m}$ среднее число приборов, занятых «ложным обслуживанием», при условии, что имеет место событие $B_{l,m}$ и $m>0$. Тогда

$$\Omega_{l,m} = \sum_{q=1}^{m} \sum_{s=q}^{n-l-m+q} q\, P\{V_{s,q}/B_{l,m}\}.$$

За единицу времени $\Omega_{l,m}$ приборов обслужат $\Omega_{l,m}\nu_2$ вызовов. За это же время поступит λ вызовов. Следовательно,

$$P\{л/B_{l,m}\} = \frac{\Omega_{l,m}\nu_2}{\lambda} = \frac{\Omega_{l,m}}{\rho_2} = \sum_{q=1}^{m} \sum_{s=q}^{n-l-m+q} \frac{q}{\rho_2} P\{V_{s,q}/B_{l,m}\},$$

т. е.

$$P\{л/B_{l,m}\} = \frac{\sum_{q=1}^{m} \sum_{s=q}^{n-l-m+q} q\, C_m^q\, C_{n-l-m}^{s-q}\, (n-l-s)!\, \rho_1^{s-q}\, \rho_2^{q-1}}{\int_0^\infty e^{-x} (x+\rho_1)^{n-l-m} (x+\rho_2)^m\, dx}. \qquad (2.10)$$

Нетрудно заметить, что числитель (2.10) равен частной производной по ρ_2 от (2.7), т. е.

$$\sum_{q=1}^{m} \sum_{s=q}^{n-l-m+q} q\, C_m^q\, C_{n-l-m}^{s-q}\, (n-l-s)!\, \rho_1^{s-q}\, \rho_2^{q-1} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial \rho_2} \int_0^\infty e^{-x} (x+\rho_1)^{n-l-m} (x+\rho_2)^m\, dx.$$

Поэтому

$$P\{л/B_{l,m}\} = \frac{\int_0^\infty m\, e^{-x} (x+\rho_1)^{n-l-m} (x+\rho_2)^{m-1}\, dx}{\int_0^\infty e^{-x} (x+\rho_1)^{n-l-m} (x+\rho_2)^m\, dx}. \qquad (2.11)$$

Вероятность телефонных потерь из-за «ложного обслуживания» вызовов

$$p_{\text{л}}=\sum_{l=0}^{n-1}\sum_{m=1}^{n-l}\left\{\frac{n!\int_0^{\tau}[P_1(t)]^{n-l-m}[P_2(t)]^{l}[P_3(t)]^{m}\,dt}{\tau\, l!\, m!\,(n-l-m)!}\times\right.$$

$$\left.\times\frac{\int_0^{\infty} m\,\mathrm{e}^{-x}(x+\rho_1)^{n-l-m}(x+\rho_2)^{m-1}\,dx}{\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-x}(x+\rho_1)^{n-l-m}(x+\rho_2)^{m}\,dx}\right\}. \qquad (2.12)$$

Очевидно,

$$p_{\text{н}}=(1-P_{\text{з}}-P_{\text{л}})\,\omega/(\nu_1+\omega). \qquad (2.13)$$

Формулы, аналогичные (2.6) и (2.10), но в несколько ином виде, были предложены в 1976 г. Л. Д. Сметаниным.

Контроль осуществляется через случайные промежутки времени. Предположим, что случайные промежутки времени между моментами контроля имеют произвольное распределение и моменты контроля приборов независимы. Обозначим через P_1, P_2 и P_3 вероятности того, что в произвольный момент времени между моментами контроля прибор будет соответственно работоспособен, заблокирован, неработоспособен, но не заблокирован. Эти вероятности могут быть получены из выражений (1.7)—(1.9). Тогда формулы (2.2), (2.9) и (2.12) соответственно примут вид

$$P\{B_{l,m}\}=\frac{n!}{l!\,m!\,(n-l-m)!}\,P_1^{n-l-m}P_2^{l}P_3^{m}; \qquad (2.14)$$

$$p_{\text{з}}=\sum_{l=0}^{n-1}\sum_{m=0}^{n-l}\frac{n!\,\rho_1^{n-l-m}\rho_2^{m}\,P_1^{n-l-m}\,P_2^{l}\,P_3^{m}}{l!\,m!\,(n-l-m)!\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-x}(x+\rho_1)^{n-l-m}(x+\rho_2)^{m}\,dx}+P_2^{n}; \qquad (2.15)$$

$$p_{\text{л}}=\sum_{l=0}^{n-1}\sum_{m=1}^{n-l}\left[\frac{n!\,P_1^{n-l-m}\,P_2^{l}\,P_3^{m}\int_0^{\infty} m\,\mathrm{e}^{-x}(x+\rho_1)^{n-l-m}(x+\rho_2)^{m-1}\,dx}{l!\,m!\,(n-l-m)!\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-x}(x+\rho_1)^{n-l-m}(x+\rho_2)^{m}\,dx}\right]. \qquad (2.16)$$

Очевидно, $p_{\text{н}}$ можно определить из (2.13). Если контроль приборов комбинированный, в том числе и ненадежный, то в (2.14) подставляются значения P_1, P_2 и P_3, рассчитанные по соответствующим формулам § 1.3.

Может представлять интерес случай, когда часть отказов приборов с параметром потока ω' не может быть обнаружена системой автоматического контроля (непрерывного, периодического или комбинированного). Эти отказы могут быть выявлены только при профилактических проверках, которые осуществляются

одновременно для всего оборудования через равные промежутки времени $T_к$. В этом случае вероятность $P\{B_{l,m}\}$ может быть определена из выражения

$$P\{B_{l,m}\}=\frac{n!}{T_к\, l!\, m!\, (n-l-m)!}\int_0^{T_к}\left(P_1 e^{-\omega' t}\right)^{n-l-m}\times$$

$$\times P_2^l\left(1-P_1 e^{-\omega' t}-P_2\right)^m dt=\frac{n!\, P_1^{n-l-m}\, P_2^l}{T_к\, l!\, m!\, (n-l-m)!}\times$$

$$\times\int_0^{T_к} e^{-\omega' t\,(n-l-m)}\left(1-P_1 e^{-\omega' t}-P_2\right)^m dt.$$

Учет надежности группового и централизованного оборудования. Предположим, что рассматриваемая группа из n приборов разделена на n_1 подгрупп по n_2 приборов в каждой, т. е. $n=n_1 n_2$. Каждая подгруппа имеет групповое оборудование с параметром потока отказов $\omega_г$ и интенсивностью восстановления $\mu_г$, отказ которого приводит к отказу подгруппы из n_2 приборов. Если пренебречь влиянием отказов отдельных приборов на телефонные потери, то для расчета $P_з$ и $P_л$ при постоянном периоде контроля можно пользоваться формулами (2.9) и (2.12), а при случайном периоде контроля — формулами (2.15) и (2.16). В этих формулах вероятности $P_1(t)$, $P_2(t)$ и $P_3(t)$, а также P_1, P_2 и P_3 будут иметь смысл вероятностей состояний групповых устройств, а все n должны быть заменены на n_1. Кроме того, показатель степени $n-l-m$ у ρ_1 и у $(x+\rho_1)$ должен быть заменен на $(n_1-l-m)n_2$. Телефонные потери за время, когда одновременно простаивают $l+m$ групповых устройств, из которых l заблокировано и находится на ремонте, определяются как

$$P_{l,m}=P\{з/B_{l,m}\}+P\{л/B_{l,m}\}, \qquad (2.17)$$

где $P\{з/B_{l,m}\}$ определяются по (2.8), а $P\{л/B_{l,m}\}$ — по (2.11), в которых также должны быть произведены указанные выше замены. Средняя длительность такой ситуации при условии, что $\omega_г \ll \mu_г$ и $\tau \gg \mu_г^{-1}$, может быть приближенно определена как $T_{l,m}\approx 1/l\mu_г$.

Если усложнить постановку задачи и учитывать как ненадежность группового оборудования, так и ненадежность отдельных приборов, то при условии, что период контроля случайный, а различные единицы оборудования контролируются в независимые моменты времени, задача может быть решена следующим образом. Введем обозначения: $P_1(Г)$, $P_2(Г)$, $P_3(Г)$—вероятности соответствующих состояний для отдельного группового устройства в произвольный момент времени; $P_1(П)$, $P_2(П)$, $P_3(П)$ — то же, для отдельного прибора (без учета состояний групповых устройств); $A_{i,j}$ — событие, заключающееся в том, что в произвольный момент времени i групповых устройств заблокированы, j —

неработоспособны, но незаблокированы, а остальные $n_1—i—j$ — работоспособны; $D_{a,b,c}$ — событие, заключающееся в том, что в произвольный момент времени заблокировано a приборов, групповые устройства которых работоспособны; неработоспособно, но не заблокировано b приборов, групповые устройства которых работоспособны; заблокировано c приборов, групповые устройства которых неработоспособны, но не заблокированы (рис. 2.1); $B_{l,m}$ —

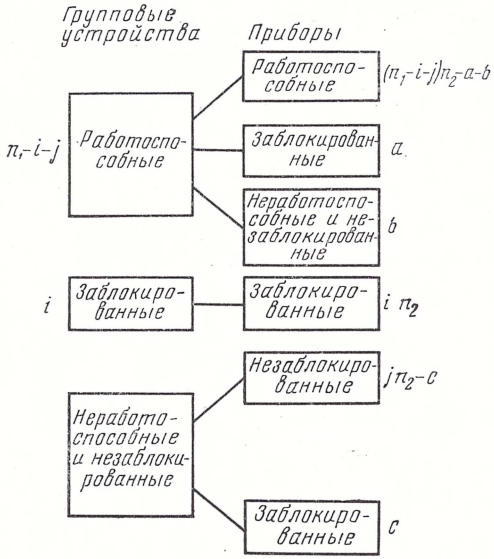

Рис. 2.1

событие, заключающееся в том, что в произвольный момент времени l приборов заблокированы (с учетом состояния групповых устройств), m приборов неработоспособны, но не заблокированы (с учетом состояния групповых устройств), а остальные $n—l—m$ приборов работоспособны.

Если выполняются условия $l \geqslant in_2$ и $l+m \geqslant (i+j)n_2$, то событие $B_{l,m}$ возможно при гипотезах $A_{i,j}$ и $D_{a,b,c}$. При этом c удовлетворяет условию $jn_2—m \leqslant c \leqslant l—in_2$. Тогда $a=l—in_2—c$; $b=m—jn_2+c$. Исходя из этого,

$$P\{A_{i,j}\} = \frac{n_1!}{i!\,j!\,(n_1-i-j)!}\,[P_1(\Gamma)]^{n_1-i-j}\,[P_2(\Gamma)]^i \times$$

$$\times [P_3(\Gamma)]^j, \quad i=0,\,1,\,2,\,\ldots,\,n_2;\ j=0,\,1,\,2,\,\ldots,\,n_2—i; \tag{2.18}$$

$$P\{D_{a,b,c}/A_{i,j}\} = \frac{[(n_1-i-j)\,n_2]!\,(jn_2)!}{a!\,b!\,[(n_1-i-j)\,n_2-a-b]!\,c!\,(jn_2-c)!} \times$$

$$\times [P_1(\Pi)]^{(n_1-i-j)\,n_2-a-b}\,[P_2(\Pi)]^{a+c}\,[P_3(\Pi)]^b\,[1-P_2(\Pi)]^{j\,n_2-c}; \tag{2.19}$$

$$P\{B_{l,m}\} = \sum_{i=0}^{E\left(\frac{l}{n_2}\right)} \sum_{j=0}^{E\left(\frac{l+m}{n_2}\right)-i} \sum_{c=j\,n_2-m}^{l-i\,n_2} P\{A_{i,j}\} P\{D_{l-in_2-c,\ m-jn_2+c,c}\,/A_{i,j}\}, \tag{2.20}$$

где $E(x)$—целая часть числа x. Вероятности телефонных потерь $p_з$ и $p_л$ могут быть вычислены по (2.3) и (2.4), в которых $P\{з/B_{l,m}\}$ и $P\{л/B_{l,m}\}$ вычисляются исходя соответственно из выражений (2.8) и (2.11), а $P\{B_{l,m}\}$—из (2.20).

Телефонные потери из-за недообслуживания можно вычислить из

$$p_н = (\omega_п + \omega_г)/(\nu_1 + \omega_п + \omega_г).$$

Для упрощения вычислений на ЭВМ формулы для расчетов телефонных потерь могут быть представлены в рекуррентном виде, как это показано в приложении П.II.

Телефонные потери за время, когда одновременно простаивают $i+j$ групповых устройств, из которых i заблокировано и находится на ремонте, могут быть получены из выражения (2.17), только в этом случае в (2.8), (2.11) и (2.17) следует заменить l на i, m на j, а показатели степени $n—l—m$ на $(n_1—i—j)n_2$. Средняя длительность такой ситуации (при $\omega_г \gg \mu_г$ и $\tau \gg \mu_г$) может быть приближенно определена как $T_{i,j} \approx 1/i\mu_г$.

Для определения телефонных потерь в полнодоступной группе приборов коммутационной системы с учетом ненадежности централизованного оборудования можно воспользоваться выражением

$$p = K_{п(ц)} + K_{г\,(ц)}\,(p_з + p_л + p_н), \tag{2.21}$$

где $K_{п(ц)}$ и $K_{г(ц)}$ — коэффициент простоя и коэффициент готовности централизованного оборудования, определенные по методике, изложенной в § 1.4, а $p_з$, $P_л$ и $p_н$ имеют смысл согласно выражению (2.1). Очевидно, $K_{п(ц)}$ и $K_{г(ц)}$ должны учитывать не только ненадежность УК, но и ненадежность групповых устройств, отказ которых приводит к отказу всей рассматриваемой группы приборов.

Если контроль комбинированный, т. е. непрерывным контролем обнаруживается только часть отказов, а остальные отказы выявляются периодическим контролем, в том числе и при ненадежном контроле, для расчета телефонных потерь могут быть использованы все формулы настоящего параграфа для случая, когда моменты контроля различных единиц оборудования независимы. При этом в формулы следует подставлять вероятности состояний P_1, P_2 и P_3, взятые для соответствующих видов комбинированного контроля из § 1.3.

2.3. Расчет показателей качества обслуживания вызовов в двухзвенной коммутационной системе с учетом ненадежности и способов контроля работоспособности линий

Постановка задачи для случая периодического контроля. Расчет вероятности телефонных потерь в двухзвенной коммутационной системе с учетом ненадежности и периодического контроля работоспособности линий достаточно сложен и может быть произведен лишь приближенно. В двухзвенной системе «ложное обслуживание» будет иметь место, если неработоспособная, но незаблокированная линия используется для соединения хотя бы на одном звене. Поэтому при расчете телефонных потерь вследствие «ложного обслуживания» необходимо различать вызовы, поступающие на второе звено, для которых на первом звене выбраны: а) работоспособная и б) неработоспособная, но незаблокированная линии. В последнем случае вне зависимости от того, работоспособная или неработоспособная, но незаблокированная линия будет выбрана на втором звене, вызов будет обслужен ложно.

Задачу рассмотрим на примере двухзвенной коммутационной системы (рис. 2.2). Число промежуточных линий между каждым коммутатором звена A и коммутаторами звена B равно n; число выходов в данном направлении на звене B — также n. Параметры потока отказов и интенсивности восстановления для одной линии звена A обозначим соответственно ω_A и μ_A, а для одного выхода звена B — соответственно ω_B и μ_B. Отказ линий (выходов) может быть обнаружен только в момент контроля, который осуществляется периодически. После обнаружения отказа линия (выход) блокируется и не может быть занята для установления соединения. С этого момента начинается ее восстановление. С момента отказа и до момента его обнаружения периодическим контролем неработоспособная линия (выход) может быть использована при обслуживании вызова («ложное обслуживание»). Обслуживание вызова будет ложным, если для установления соединения используется неработоспособная, но незаблокированная линия (выход) хотя бы на одном звене. Обозначим длительность занятия работоспособного соединительного пути ν_1, при «ложном обслуживании» — ν_2, интенсивность телефонной нагрузки на линии звена A — λ_A, на выходы звена B — λ_B.

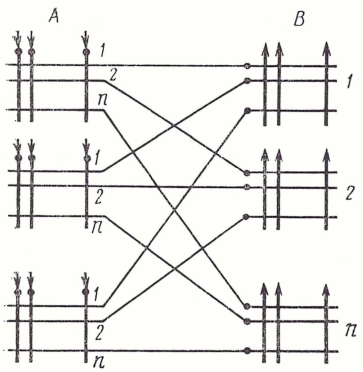

Рис. 2.2

В рассматриваемой двухзвенной коммутационной системе могут быть следующие виды телефонных потерь:

из-за отсутствия свободных незаблокированных линий на звене A или выходов на звене B или из-за внутренних блокировок в коммутационной системе $p_з$;

из-за выбора для установления соединения хотя бы на одном звене неработоспособной, но незаблокированной линии или выхода («ложное обслуживание») $p_л$;

из-за прекращения обслуживания вызова вследствие отказа участвующих в соединении линии или выхода (недообслуживание) $p_н$.

Поэтому вероятность телефонных потерь может быть рассчитана в соответствии с (2.1). Как и в § 2.2, рассмотрим следующие два случая расчета показателей качества обслуживания вызовов:

1) когда период контроля постоянный и все линии и выходы контролируются одновременно;

2) когда период контроля случайный, а каждая линия или выход контролируется в разные (независимые) моменты времени.

Контроль с постоянным периодом. Обозначим период контроля через τ. Каждая линия (выход) в момент времени t после очередной проверки может находиться в трех состояниях, вероятности которых для каждого звена приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ состояния	Состояние линии (выхода)	Вероятность состояния	
		звена A	звена B
1	Работоспособна	$P_{A1}(t)$	$P_{B1}(t)$
2	Неработоспособна и заблокирована	$P_{A2}(t)$	$P_{B2}(t)$
3	Неработоспособна, но не заблокирована	$P_{A3}(t)$	$P_{B3}(t)$

Эти вероятности могут быть получены по (1.2)—(1.4). Кроме того, введем следующие обозначения: $B_{l,m}$ — событие, состоящее в том, что в произвольный момент времени после момента контроля n—l—m линий звена A находятся в состоянии *1*, l—в состоянии *2* и m — в состоянии *3*, где $l=0, 1, 2, ..., n$; $m=0, 1, 2, ..., n-l$; $B_{l', m'}$ — то же, для звена B; $P\{з/B_{l,m}B_{l', m'}\}$ — условная вероятность телефонных потерь из-за отсутствия свободных незаблокированных линий (выходов) или внутренних блокировок в коммутационной системе при условии, что имеют место события $B_{l,m}$ и $B_{l', m'}$; $P\{лA/B_{l,m}B_{l', m'}\}$ — условная вероятность телефонных потерь вследствие «ложного обслуживания», обусловленного выбором неработоспособной линии звена A при условии, что имеют место события $B_{l,m}$ и $B_{l', m'}$; $P\{лB/B_{l,m}B_{l', m'}\}$ — то же, когда лож-

ное обслуживание обусловлено выбором неработоспособного выхода звена B.

Для упрощения расчетов примем следующие допущения:

число неработоспособных линий (выходов) в каждом звене невелико, т. е. можно подобрать такие значения $l_{\text{макс}}$, $l'_{\text{макс}}$, $m_{\text{макс}}$ и $m'_{\text{макс}}$, при которых практически будут выполняться неравенства: $l \leqslant l_{\text{макс}}$, $l' \leqslant l'_{\text{макс}}$, $m \leqslant m_{\text{макс}}$, $m' \leqslant m'_{\text{макс}}$;

вероятность того, что при установлении соединения будут использованы неработоспособные и незаблокированные линии (выходы) обоих звеньев, пренебрежимо мала, а поэтому «ложное обслуживание» практически будет обусловлено использованием неработоспособных незаблокированных линий (выходов) только на одном из звеньев. Тогда

$$p_{\text{з}} = \sum_{l=0}^{l_{\text{макс}}} \sum_{l'=0}^{l'_{\text{макс}}} \sum_{m=0}^{m_{\text{макс}}} \sum_{m'=0}^{m'_{\text{макс}}} P\{B_{l,m}\} P\{B_{l',m'}\} P\{з/B_{l,m} B_{l',m'}\},$$

где $P\{B_{l,m}\}$ и $P\{B_{l',m'}\}$ вычисляются по (2.2);

$$p_{\text{л}} = \sum_{l=0}^{l_{\text{макс}}} \sum_{l'=0}^{l'_{\text{макс}}} \sum_{m=0}^{m_{\text{макс}}} \sum_{m'=0}^{m'_{\text{макс}}} P\{B_{l,m}\} P\{B_{l',m'}\}(1 - P\{з/B_{l,m} B_{l',m'}\}) \times$$

$$\times (P\{л A/B_{l,m} B_{l',m'}\} + P\{лB/B_{l,m} B_{l',m'}\}).$$

Для $m=0$ $P\{лA/B_{l,0}B_{l',m'}\}=0$ и для $m'=0$ $P\{лB/B_{l,m}B_{l',0}\}=0$.

Формулы для расчета условных вероятностей $P\{з/B_{l,m}B_{l',m'}\}$, $P\{лA/B_{l,m}B_{l',m'}\}$, $P\{лB/B_{l,m}B_{l',m'}\}$ при различных законах распределения числа занятых линий (выходов) звеньев A и B приведены в приложении П.III.

Вероятность потерь из-за недообслуживания может быть определена как

$$p_{\text{н}} = (1 - p_{\text{з}} - p_{\text{л}}) \frac{\omega_A + \omega_B}{v_1 + \omega_A + \omega_B}.$$

Контроль осуществляется через случайные промежутки времени. Как и в § 2.2, будем предполагать, что случайные промежутки времени между моментами контроля имеют произвольное распределение и моменты контроля приборов независимы. В этом случае методика расчета остается такой же, как и для случая постоянного периода контроля, только вероятности $P\{B_{l,m}\}$ и $P\{B_{l',m'}\}$ вычисляются по (2.14).

При использовании комбинированного контроля методика расчета остается прежней, но при расчете $P\{B_{l,m}\}$ и $P\{B_{l',m'}\}$ по (2.14) вероятности состояний P_1, P_2 и P_3 линий (выходов) соответствующих звеньев следует вычислять по формулам для соответствующих видов контроля, приводимым в § 1.3. При иерархичной структуре звеньев формулы значительно усложняются и здесь не приводятся.

Учет ненадежности централизованного оборудования осуществляется по (2.21) так же, как это показано в предыдущем параграфе. Аналогично может быть составлена методика и для расчета вероятности телефонных потерь в многозвенной коммутационной системе. Однако при этом приходится сделать еще целый ряд упрощающих расчеты допущений, вследствие чего расчетные формулы получаются весьма приближенными. Из-за ограниченного объема книги эта методика здесь не приводится.

2.4. Оценка качества обслуживания вызовов в сложных коммутационных системах с учетом ненадежности и способов контроля работоспособности оборудования

Коммутационные системы перспективных коммутационных узлов и станций (квазиэлектронных, электронных и т. п.), как правило, представляют собой сложные многозвенные системы с различными алгоритмами установления соединений. В таких системах могут также использоваться неполнодоступные включения. Показатели качества обслуживания вызовов в таких системах даже без учета надежности и методов контроля работоспособности оборудования на современном уровне развития теории телефонных сообщений не всегда поддаются аналитическим методам решения. Наиболее реальным при оценке этих показателей для таких коммутационных систем является метод статистического моделирования [18].

Для оценки показателей качества обслуживания вызовов в сложных коммутационных системах с учетом ненадежности и методов контроля работоспособности оборудования является целесообразным сочетать методы статистического моделирования и аналитический. При этом вероятности состояний системы, обусловленные ненадежностью и способом контроля работоспособности оборудования (индивидуального и группового), отказ которого приводит к неработоспособности как отдельных, так и групп промежуточных соединительных путей и выходов, целесообразно рассчитывать аналитически, а условные вероятности телефонных потерь при этих состояниях оценивать путем статистического моделирования. Поскольку в рассматриваемых коммутационных узлах и станциях в основном будет иметь место комбинированный контроль оборудования, то, в общем случае, в каждом состоянии системы часть неработоспособных промежуточных соединительных путей или выходов может быть заблокирована, а остальные — не заблокированы. Использование при установлении соединения неработоспособных, но незаблокированных промежуточных соединительных путей или выходов, хотя бы в одном звене, будет приводить к телефонным потерям вследствие ложного обслуживания.

Введем следующие обозначения: W_i — вероятность i-го состояния коммутационной системы, которое может быть рассчитано

аналитически при помощи методов, описанных в гл. 1 и 2; $P\{з/i\}$ — условная вероятность телефонных потерь из-за отсутствия свободных незаблокированных соединительных путей (выходов) или из-за внутренних блокировок в коммутационной системе при условии, что система находится в i-м состоянии; $P\{л/i\}$ — условная вероятность телефонных потерь вследствие ложного обслуживания при условии, что система находится в i-м состоянии; две последние вероятности определяются путем статистического моделирования коммутационной системы в i-м состоянии; k — число учитываемых состояний системы; для упрощения расчетов целесообразно ограничить число состояний только теми, которые оказывают существенное влияние на результаты расчета. Тогда

$$p_з = \sum_{i=0}^{k} W_i P\{з/i\}; \quad (2.22) \qquad p_л = \sum_{i=0}^{k} W_i P\{л/i\}. \quad (2.23)$$

С учетом надежности централизованного оборудования суммарные телефонные потери в коммутационной системе могут быть вычислены из (2.21).

Глава 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТЕЙ СВЯЗИ ПРИ ЗАДАННОЙ ТРУДОЕМКОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

3.1. Основные методы организации технического обслуживания элементов сетей связи

Одним из мероприятий по обеспечению надежности элементов сетей, воздействующим на их ремонтопригодность, является сокращение времени простоя оборудования путем выбора рациональной системы технического обслуживания на сети (см. § 1.1). Под техническим обслуживанием (ТО) элемента сети следует понимать совокупность работ по осмотру, проверке, регулировке, устранению последствий повреждений, отказов и т. п. Из числа методов ТО, применяемых на существующих или перспективных коммутируемых телефонных сетях, можно выделить следующие: профилактический, восстановительный и статистический.

Снижение трудоемкости ТО является одной из основных проблем, решаемых при проектировании перспективных коммутационных узлов и станций. Поэтому в технических требованиях к коммутационным узлам и станциям обязательно указываются требования к трудоемкости их ТО.

Профилактический или предупредительный метод ТО является наиболее распространенным методом обслуживания практиче-

ски всех элементов сетей, находящихся в настоящее время в эксплуатации. Он заключается в том, что оборудование элемента сети независимо от его состояния в строго регламентированные сроки подвергается проверке по определенной программе. Целью профилактического обслуживания являются предупреждение возникновения отказов и устранение имеющих место к моменту проведения профилактических работ повреждений и отказов.

Таким образом, профилактический метод включает в себя профилактические и ремонтные работы. К профилактическим работам относятся чистка и осмотр оборудования, функциональные испытания, замена деталей, отработавших предельно допустимое время. При этом замену можно производить двумя способами:

заменять конструктивные элементы одного типа (включая и те, которые были заменены между профилактиками) новыми через промежуток времени, равный среднему сроку службы элемента;

заменять только те элементы, которые достигли предельного состояния, при этом наступление предельного состояния определяется приближенно посредством периодических проверок.

Обычно при профилактическом методе обслуживания стремятся добиться возможно более высокого качества обслуживания вызовов элементом сети независимо от того, какой уровень качества функционирования был до профилактики.

Восстановительный метод состоит в том, что ремонтные работы проводятся не с «жесткой» периодичностью, а на основе анализа данных об отказах, выявляемых при помощи системы контроля и сигнализации или по заявкам (рекламации) абонентов. При этом целью профилактических работ являются выявление отказов узлов по заявкам абонентов и определение объема предстоящих ремонтных работ.

Статистический метод обслуживания состоит в том, что ремонтные работы начинаются лишь после того, как качество обслуживания вызовов достигает критической величины. При этом обслуживающий персонал не стремится к полной ликвидации непрохождений по вине оборудования. Техническое обслуживание направлено на то, чтобы при минимальных затратах содержать оборудование в таком состоянии, когда качество обслуживания вызовов находится в пределах допустимых норм.

Сравнивая перечисленные методы ТО, можно отметить, что все они имеют и положительные и отрицательные моменты.

Профилактический метод получил широкое распространение в силу того, что многие коммутационные узлы и станции содержат детали, срок службы которых значительно меньше допустимого срока службы оборудования станции (узла). Кроме того, ряд деталей нуждается в постоянном уходе — регулировке, смазке и т. п. Поэтому для обеспечения определенного срока службы оборудования узла или станции необходимо заменять отработавшие свой срок детали. Многолетний опыт применения профилактического

метода обслуживания выявил такие его недостатки, как большие эксплуатационные расходы; ухудшение качества обслуживания вызовов в послепрофилактический период из-за внесения дополнительных повреждений во время профилактики; большой объем зачастую бесполезной работы; высокая стоимость даже незначительного улучшения качества обслуживания вызовов станцией и т. п. [19].

Восстановительный метод, хотя и обеспечивает уменьшение (по сравнению с профилактическим) эксплуатационных затрат, приводит к существенным колебаниям качества обслуживания вызовов. Это происходит по причине значительной интенсивности отказов деталей и несовершенных методов контроля работоспособности оборудования существующих коммутационных узлов и станций. Все это приводит к накоплению невыявленных отказов и к невозможности их быстрого отыскания и устранения.

Статистический метод обеспечивает значительно меньшие колебания качества обслуживания вызовов по сравнению с восстановительным методом и требует меньших затрат по сравнению с профилактическим методом. Однако для его реализации необходимо вводить всеобъемлющий контроль работоспособности оборудования и постоянный контроль качества обслуживания вызовов, что требует значительных затрат. В «чистом виде» статистический метод обслуживания может быть реализован только при организации ТО перспективных коммутационных узлов и станций, построенных на высоконадежной элементной базе (интегральных микросхемах) и использующих в качестве централизованного управляющего устройства специализированные управляющие машины. Только в этом случае возможно охватить непрерывным контролем основные блоки оборудования узла, станции. Действительно, в перспективных системах, таких, как АТСЭ, АТСКЭ и тем более АТСЭ интегральной цифровой сети связи (ИЦСС), возможен не только более полный контроль работоспособности и качества обслуживания вызовов, но и более простая и быстрая локализация отказавших блоков, не требующая вмешательства обслуживающего персонала. Однако в таких системах основным оборудованием являются общестанционные и управляющие устройства, отказ которых приводит к резкому росту потерь. Несмотря на резервирование, восстанавливать отказавшие блоки следует по возможности немедленно (хотя качество обслуживания абонентов в данный момент времени может быть и удовлетворительным) в силу увеличившейся вероятности аварийной ситуации. При этом возможно допустить накопление отказов индивидуальных приборов (линий). Однако даже перспективные станции, по-видимому, будут иметь отдельные устройства, не охваченные системой контроля из-за технических трудностей и больших капитальных затрат. Кроме того, сами элементы контролирующего оборудования могут отказывать и давать неверную информацию о состоянии системы, что также увеличивает вероятность аварийной ситуации.

Поэтому ни один из перечисленных выше способов ТО (если они используются в отдельности) не может обеспечить состояние системы, при котором вызовы обслуживаются с требуемым качеством. Видимо, целесообразно комплексное использование различных способов ТО [20]. В зависимости от особенностей каждой станции, допустимой трудоемкости ТО и требований к качеству обслуживания вызовов доля и содержание каждого метода ТО могут быть различны. Так, при ТО перспективных типов коммутационных узлов и станций профилактическое обслуживание может сводиться к проверке работоспособности контрольного и вспомогательного оборудования, оборудования, не охваченного системой контроля, к измерению качественных характеристик разговорного тракта и т. д. Периодичность проведения профилактических работ будет определяться показателями надежности системы и требованием к качеству обслуживания вызовов.

Восстановительный метод при этом будет состоять в восстановлении работоспособности по заявкам отдельных абонентов или групп абонентов (отказы индивидуальных или групповых устройств), восстановлении работоспособности централизованных устройств в целях предотвращения появления аварийных ситуаций. Но основным, по-видимому, будет статистический метод ТО с накоплением отказов определенных категорий блоков оборудования.

Предполагается, что внедрение перспективных типов коммутационных узлов и станций может в значительной степени повлиять на методы ТО существующих систем, так как на базе первых могут быть организованы центры технической эксплуатации (ЦТЭ), включающие в сферу влияния последние. При этом дополнительные затраты на разработку оборудования, позволяющего более качественно контролировать работоспособность станций различных типов, должны быстро окупиться за счет экономии эксплуатационных затрат. Так, в [3] указывается, что городские декадно-шаговые АТС требуют примерно в 5—6 раз больше обслуживающего персонала, чем координатные и квазиэлектронные.

Существует мнение [21], что современные квазиэлектронные и тем более электронные коммутационные станции могут допускать трудоемкость ТО порядка 0,005 чел.-ч на единицу емкости в год, если среднее время восстановления равно 30 мин. Однако расчеты показывают, что организовать круглосуточное обслуживание даже станций большой емкости при такой трудоемкости ТО не представляется возможным [22]. Поэтому станции должны быть частично обслуживаемыми в одну смену. Сам факт односменной работы повышает трудоемкость ТО до 0,15—0,20 ч на единицу емкости в год (для станций 10—20-тысячной емкости).

Основываясь на опыте эксплуатации коммутационных станций с программным управлением, некоторые зарубежные фирмы разработали и внедряют в практику централизованную систему ТО. Для этого предполагается создание единого центра технической эксплуатации (ЦТЭ) для 15—20 станций (общая емкость порядка

$3 \cdot 10^5$ номеров), в котором будет сосредоточено все оборудование, необходимое для ТО. Такой центр должен быть оснащен специальной вычислительной техникой для решения задач организации эксплуатации.

Все коммутационные узлы и станции, включенные в сферу обслуживания, соединяются с ЦТЭ каналами передачи данных. Таким образом, информация, позволяющая судить о состоянии станций, поступает в ЦТЭ, где она обрабатывается при помощи ЭВМ, и на основании полученных результатов принимается соответствующее решение по организации ремонтно-восстановительных работ. При этом возможно двухфазное и однофазное ТО. Под однофазным понимается такой способ ТО коммутационных узлов и станций, при котором полное восстановление отказавшего блока оборудования производится одним или группой ремонтников непосредственно на отказавшей станции. Под двухфазным понимается способ, при котором на первой фазе обслуживания происходят отыскание отказавшего блока и его замена (если имеется идентичный запасной блок), а полное восстановление осуществляется другой группой специалистов на ЦТЭ.

Поскольку отказы различных блоков оборудования неодинаково влияют на качество функционирования всей системы в целом из-за иерархичной структуры коммутационных узлов и станций, при ограниченном восстановлении в случае наличия очереди на восстановление целесообразно сначала восстановить оборудование более высокой категории (оборудование, отказ которого приводит к более серьезным последствиям) [23]. Другими словами, ремонтник должен обслуживать (восстанавливать) $k (k > 1)$ типов отказавших устройств, отличающихся друг от друга некоторой «степенью важности». Для того чтобы отличать типы устройств по «степени важности», целесообразно присваивать каждому типу устройств (блоков) приоритетный индекс (номер) $i (1 \leqslant i \leqslant k)$, где 1 обозначает самую высокую «степень важности», а k — самую низкую. Дисциплина, согласно которой выбирается следующий отказавший блок для восстановления, называется приоритетной дисциплиной [24]. Она должна определять правила для принятия следующих решений: какой блок должен выбрать ремонтник при последующем восстановлении после окончания предыдущего; продолжить или прервать восстановление блока в случае, если в этот момент откажет блок более высокой категории.

Решение о выборе следующего блока для восстановления может быть принято внесистемно, т. е. оно может зависеть от номера приоритета, соответствующего данному блоку, или внутрисистемно, т. е. решение может базироваться полностью или частично на заключениях, касающихся текущего состояния обслуживающей системы (например, времени ожидания обслуживания в текущий момент, времени окончания обслуживания, предполагаемого времени освобождения любого другого ремонтника, способного принять к обслуживанию данную заявку, и т. п.). Первая из упомянутых выше дисциплин называется внесистемной приоритетной

дисциплиной, а вторая — внутрисистемной приоритетной дисциплиной [24]. В обоих случаях решение о продолжении обслуживания может зависеть (динамический приоритет) или не зависеть (статический приоритет) от состояния обслуживаемой системы (например, качества обслуживания узлом или станцией поступающих вызовов). Внутрисистемные приоритетные дисциплины почти не изучены, хотя они более подходят для описания реальных процессов. При внесистемных приоритетных дисциплинах различают:

абсолютный приоритет, при котором восстановление блока j-й категории немедленно прерывается и начинается восстановление блока i-й категории (при $i<j$);

относительный приоритет, при котором восстановление блока j-й категории продолжается до полного завершения (приоритет, не превышающий обслуживания);

смешанный приоритет, при котором может быть выбран первый или второй случай в зависимости от каких-либо дополнительных условий, например от длительности обслуживания требования j-го приоритета, и т. д.

При непрерывном (круглосуточном) обслуживании приоритетность, по-видимому, не будет играть существенной роли, поскольку поток отказов оборудования будет незначительным (для перспективных систем) и вероятность появления двух отказов одновременно (с учетом реального времени восстановления) будет незначительна. Однако возможно обслуживание, при котором на некоторых отрезках времени (например, в ночное время) восстановление не производится. Кроме того, возможно накопление отказов, т. е. некоторые блоки оборудования узла или станции не восстанавливаются до тех пор, пока качество обслуживания вызовов не ухудшится до заданных пределов. В этом случае приоритетность в обслуживании может играть решающую роль для поддержания качества обслуживания вызовов на заданном уровне.

Однофазная централизованная система ТО предполагает, что на одной из станций (узлов) осуществлена полная или наибольшая централизация средств аварийно-восстановительной службы. На ней же располагается административный центр с производственно-техническими отделами. Эта станция может обслуживаться круглосуточно (наиболее вероятный вариант) или в определенные часы суток. Другие станции (узлы) могут обслуживаться в определенное время суток, например в ЧНН или по мере приближения качества функционирования к критическому. В данном случае под обслуживанием понимается только восстановление отказавших блоков оборудования без учета других видов работ, которые необходимо выполнять на станции. Известно, например, что декадно-шаговые АТС обслуживаются круглосуточно из-за неэффективной системы контроля и блокировки отказавших блоков оборудования, низкой надежности элементов, т. е. по причине несовершенства оборудования и в целях противопожарной безопасности.

Для этих станций возможен вариант ТО, допускающий использование дежурного персонала сравнительно низкой квалификации. Восстановительные работы могут вестись централизованно разъездными бригадами ремонтников более высокой квалификации.

Двухфазная система обслуживания отличается от однофазной тем, что ремонт отказавших блоков производится в мастерской на ЦТЭ при помощи соответствующей контрольно-измерительной аппаратуры. По-видимому, качество восстановления в этом случае будет выше, чем при однофазном обслуживании.

Оба рассмотренные варианта централизованного обслуживания могут быть успешно реализованы, если предусмотреть:

возможность периодического анализа аварийно-технического состояния блоков оборудования станции, а также в любой момент с пульта контроля ЦТЭ и с пульта проверяемой станции с локализацией отказавшего блока и выдачей адреса;

регистрацию и анализ на ЭВМ определенных параметров, таких, как нагрузка (поступающая и пропущенная), потери вызовов для определенного направления связи и т. п.;

передачу на центральный пульт сведений о накопленных отказах блоков всех станций, включенных в сферу обслуживания данного ЦТЭ;

унификацию блоков оборудования и удобство замены конструктивных групп и т. д.

Эти задачи должны быть решены при организации ЦТЭ. Для возможности организации ремонтно-восстановительных работ в составе ЦТЭ целесообразно иметь такие отделы или группы специалистов, как группа контроля за качеством (ГКК); аналитическая группа (АГ); оперативная группа (ОГ); ремонтная группа (разъездные бригады); центральная мастерская; группа материально-технического снабжения.

Функционирование ЦТЭ состоит в следующем. Информация о состоянии различных блоков оборудования станций по специальным каналам передается в ГКК, которая осуществляет контроль за состоянием оборудования различных станций. При этом может быть использовано несколько уровней контроля, например:

контроль за прохождением различных операций при предоставлении абонентам каналов и выявление ошибок, сбоев, помех при помощи оборудования контроля и сигнализации, находящегося на станциях;

контроль искусственной нагрузкой при помощи устройства, моделирующего телефонные установки и осуществляющего телефонную связь между абонентами;

принудительный контроль при помощи аппаратуры, имеющейся в составе ЦТЭ и позволяющей получить информацию о состоянии оборудования в любой момент времени.

Функциями ГКК являются первичная обработка поступающей информации и сортировка данных об отказах (например, распознавание сбоя от отказа и т. п.); сбор и передача статистических данных в АГ в виде, удобном для обработки их на ЭВМ. Анали-

тическая группа производит более глубокий анализ информации, поступающей от ГКК, разрабатывает программы для обработки полученной информации на ЭВМ с целью более точного определения неисправного узла или платы и оценки качества функционирования станций с учетом отказавшего оборудования. Информация о состоянии станций с учетом отказавшего блока, а также информация о наличии (или отсутствии) резервных блоков, плат, аналогичных отказавшим, передается в ОГ для принятия решения об организации восстановления, зависящего в общем случае от принятой фазности обслуживания.

В состав ремонтной группы могут входить специализированные бригады по обслуживанию станций различных типов (например, бригады по обслуживанию АТСКЭ, АТСЭ и т. д.). Кроме того, может быть осуществлена специализация ремонтного персонала по обслуживанию различных блоков оборудования (например, индивидуального оборудования, управляющего оборудования и т. д.). При однофазном обслуживании ремонтные бригады могут быть сосредоточены в цехах станций соответствующих типов. Структура цехов определяется надежностью оборудования станции. При достаточной надежности оборудования ремонтники могут быть сконцентрированы в одном месте (по крайней мере, высококвалифицированные), откуда они будут выезжать для восстановления отказавших блоков оборудования закрепленных за ними станций. Недостаточно высокая надежность оборудования станций может компенсироваться присутствием на них технического персонала. Если оборудование требует постоянного вмешательства обслуживающего персонала, то он может находиться на станциях, а рекомендации по восстановлению поступают в этом случае из ОГ прямо на станцию. В первом случае они поступают в соответствующий цех, руководство которого принимает решение по организации восстановления.

При двухфазном обслуживании цеха занимаются вопросами развития, административно-хозяйственной деятельностью и т. п. Техническое обслуживание (замена отказавших блоков и доставка их в центральную мастерскую для ремонта — вторая фаза) выполняется небольшой бригадой. Иногда ремонт отдельных наиболее сложных блоков целесообразно производить на заводе-изготовителе станций. Для этого необходимо иметь определенное количество запасных блоков. Однако большинство блоков оборудования станций существующих типов заменить новыми практически невозможно или крайне затруднительно. Поэтому указанный вариант ТО может найти применение в перспективных системах, таких, как АТСКЭ, АТСЭ, ИЦСС и т. п., имеющих блочную конструкцию и предусматривающих возможность быстрой замены. На станциях указанных типов имеются все возможности для организации двухфазного обслуживания, целесообразность которого обусловлена значительной сложностью оборудования и необходимостью высокой квалификации технического персонала. Поскольку с точки зрения заданной трудоемкости организовать обслуживание

перспективного узла или станций независимо от обслуживания других узлов и станций сети затруднительно, то ремонтная группа будет обслуживать несколько станций, что при их территориальной разобщенности приведет к значительной затрате времени на переезд от станции к станции. Занятость высококвалифицированных специалистов значительно выше, если они производят восстановление отказавших блоков в централизованной мастерской, доставляемых с отказавших станций менее квалифицированными специалистами.

3.2. Определение требуемой надежности блоков оборудования узлов и станций при заданных трудоемкости технического обслуживания и качестве обслуживания вызовов

При проектировании перспективных коммутационных узлов и станций наряду с показателями качества обслуживания вызовов задается средняя суммарная трудоемкость ТО узла или станции за один год по отношению к единице емкости. Поэтому при определении требований к надежности оборудования городских и сельских коммутационных узлов и станций, для которых оценка потерь предприятий связи и потребителей услуг связи сопряжена со значительными трудностями, целесообразно исходить из этих двух заданных показателей. При этом необходимо учитывать достигнутый или реально достижимый к моменту начала серийного выпуска оборудования уровень надежности элементной базы оборудования.

Таким образом, если в качестве одного из показателей надежности отдельных блоков оборудования станций принять коэффициент простоя, который связан с параметром потока отказов ω и средним временем его простоя $T_{\text{п}}$, то при фиксированном ω изменение коэффициента простоя будет определяться изменением среднего времени простоя. Задача определения требуемой надежности элементов сетей при известных параметрах потока отказов компонентов сводится к определению минимального времени простоя блоков оборудования, при котором трудоемкость ТО не будет превышать заданного значения, а качество обслуживания вызовов будет не ниже допустимого. При этом среднее время простоя $T_{\text{п}}$ в зависимости от выбранного варианта ТО, объема ЗИП, способов обеспечения надежности оборудования, параметров системы контроля работоспособности оборудования в общем случае будет равно

$$T_{\text{п}} = \theta + T_{\text{обн}} + T_{\text{ож}} + T_{\text{в}} + T_{\text{пр}},$$

где θ — среднее время от момента возникновения отказа до начала контроля; $T_{\text{обн}}$ — среднее время, затрачиваемое на поиск отказавшего устройства и его блокировку; $T_{\text{ож}}$ — среднее время ожидания начала восстановления из-за занятости ремонтника; $T_{\text{в}}$ — среднее время восстановления устройства; $T_{\text{пр}}$ — время проезда от ЦТЭ до станции.

Из приведенной формулы видно, что трудоемкость ТО зависит от времени, затраченного на обнаружение отказа, его восстановление и проезд. Кроме того, имеется ряд других факторов, влияющих на перечисленные выше составляющие: например, время подготовки инструмента, приборов, получение на складе запасных деталей и устройств и т. д. Последние факторы должны быть учтены при определении составляющих времени, входящих в $T_п$ или $T_в$.

Факторы, влияющие на трудоемкость ТО, можно условно разделить на две группы. К первой группе относятся конструктивно-технологические особенности оборудования узлов и станций, такие, как: надежность блоков оборудования; способ монтажа деталей; степень удобства их ремонта и замены; глубина и способ контроля работоспособности блоков оборудования; совершенство контрольно-измерительного оборудования и инструментов, используемых при ремонте, и т. д. Ко второй группе относятся организационные факторы, такие, как: формы и методы ТО; квалификация технического персонала; численность обслуживающего персонала; степень обеспечения необходимым количеством запасных деталей, средствами передвижения и т. д.

Трудоемкость ТО коммутационных узлов и станций чаще всего задается в человеко-часах в год на единицу их емкости (например, на один или 100 номеров) или на отдельные элементы оборудования. Поскольку коммутационные узлы и станции содержат большое количество разнотипных элементов, то для облегчения нормирования иногда основываются на трудоемкости обслуживания основных компонентов оборудования (например, реле, вертикалей МКС и т. д.). Если принять, что трудоемкость обслуживания станций определенного типа за год в пересчете на единицу емкости T_i задана, то допустимая трудоемкость технического обслуживания сети из n станций $H_с$ может быть определена простым суммированием:

$$H_с = \sum_{i=1}^{n} N_i T_i,$$

где N_i — емкость i-го узла или станции.

Оптимизация ТО будет сводиться к нахождению такого варианта, при котором рассчитанная трудоемкость ТО и телефонные потери не будут превышать допустимых значений. При этом по возможности необходимо стремиться к уменьшению расчетных значений трудоемкости ТО и телефонных потерь. Наиболее целесообразной формой ТО является комбинация различных методов, например профилактического и восстановительного методов обслуживания. Тогда затраты времени на ТО будут складываться из затрат времени на профилактическое $H_п$ и восстановительное обслуживание $H_р$, т. е. $H_с \geqslant H_п + H_р$. Допустимые затраты времени на ремонтно-восстановительное обслуживание будут $H_{р.доп} \leqslant H_с - H_п$.

При централизованном обслуживании сети, состоящей из n станций, время, затрачиваемое на профилактическое обслуживание за календарный период T (например, $T=1$ год), будет равно

$$H_{\text{п}}=\frac{T}{T_{\text{к}}}\sum_{q=1}^{n}\left(\sum_{i=1}^{c}m_{(i,\,q)}\,T_{\text{п}\,(i,\,q)}+\frac{2l_q}{v_q}\right),$$

где c — число категорий оборудования; $m_{(i,q)}$ — число блоков i-й категории, подлежащих профилактике, на q-й станции; l_q — расстояние от ЦТЭ до q-й станции; v_q — скорость проезда; $T_{\text{п}(i,q)}$ — время, затрачиваемое на профилактику блока i-й категории q-й станции.

Если при проведении профилактики устраняются имеющиеся скрытые отказы, то время, затрачиваемое на профилактическое обслуживание, можно определить из выражения

$$H_{\text{п}}=\frac{T}{T_{\text{к}}}\sum_{q=1}^{n}\left\{\sum_{i=1}^{c}m_{(i,\,q)}\left[\theta_{i,q}(T_{\text{к}})\,T_{\text{в}\,(i,\,q)}+T_{\text{п}\,(i,\,q)}\right]+\frac{2\,l_q}{v_q}\right\},$$

где $\theta_{i,q}(T_{\text{к}})$ — вероятность появления скрытого отказа блока за время $T_{\text{к}}$; $T_{\text{в}(i,q)}$ — время, затрачиваемое на ремонт блока i-й категории q-й станции; $T_{\text{к}}$ — период проведения профилактики. Оптимальные значения $T_{\text{к}}$ определяются из технико-экономических соображений, поскольку, с одной стороны, уменьшение $T_{\text{к}}$ приводит к улучшению качества функционирования узлов и станции, с другой стороны — к увеличению трудоемкости ТО и эксплуатационных затрат. Для узлов и станций, находящихся в эксплуатации, трудоемкость обслуживания различных блоков оборудования может быть определена на основе статистических данных. Для вновь проектируемых систем она может быть оценена априорно на основании опыта эксплуатации близких типов узлов и станций или задана заказчиком в качестве одного из требований технического задания на изготовление аппаратуры.

Исходя из допустимой трудоемкости ремонтно-восстановительного обслуживания $H_{\text{р.доп}}$ и фонда рабочего времени одного ремонтника $T_{\text{о.р}}$, определяется максимально допустимая численность обслуживающего персонала: $R_{\text{доп}}=H_{\text{р.доп}}/T_{\text{о.р}}$. При однофазном варианте ТО задача далее сводится к определению времени простоя блоков оборудования и качества функционирования узлов и станций обслуживаемой сети связи по методике, изложенной в § 3.3. При двухфазном варианте ТО необходимо обслуживающий персонал распределить по фазам обслуживания. Как при однофазном, так и при двухфазном вариантах обслуживания ремонтники распределяются еще и по рабочим сменам. При трехсменной работе общее число ремонтников может быть определено из соотношения

$$R=\sum_{j=1}^{n_{\text{ф}}}\sum_{i=1}^{3}R_{j,i},$$

где $R_{j,i}$ — число ремонтников, работающих в i-ю смену на j-й фазе обслуживания; $n_ф$ — число фаз обслуживания.

Таким образом, определение требуемой надежности блоков оборудования коммутационных узлов и станций при заданной трудоемкости ТО, параметрах потока отказов отдельных блоков оборудования и качестве обслуживания вызовов сводится к следующему:

1) исходя из заданной трудоемкости ТО на единицу емкости в год, а также емкости узлов и станций обслуживаемой сети, определяется допустимая трудоемкость ТО сети;

2) исходя из полученной трудоемкости ТО сети и фонда рабочего времени одного ремонтника, определяется максимально допустимая численность обслуживающего персонала;

3) рассчитанная численность технического персонала распределяется по фазам ТО и рабочим сменам таким образом, чтобы достигалось минимальное время простоя блоков оборудования[1]; это определяется методом последовательного перебора вариантов;

4) одновременно, исходя из полученных значений среднего времени простоя[2] оборудования, определяются телефонные потери в направлении связи. При этом выбирается направление связи, в котором качество обслуживания вызовов по сравнению с другими направлениями наихудшее.

Если ни один из вариантов ТО не обеспечивает требуемого качества обслуживания вызовов, то необходимо использовать следующие способы уменьшения времени простоя блоков оборудования: резервирование блоков оборудования, уменьшение непроизводительных затрат времени при организации ремонта (времени переезда, времени обнаружения отказа и т. д.), повышение квалификации обслуживающего персонала и т. п.

При определении требуемой надежности блоков оборудования вновь проектируемых коммутационных узлов и станций имеется возможность предъявлять определенные требования не только к времени простоя отдельных блоков оборудования, но и к их параметрам потока отказов. При этом уменьшить ожидаемый параметр потока отказов разрабатываемого оборудования сравнительно легче, чем действующего, поскольку можно заменить элементную базу более надежной или предусмотреть соответствующий способ резервирования.

Методика определения требуемой надежности проектируемых коммутационных узлов и станций отличается тем, что производится вероятностно-логический анализ структурной схемы, если выбранная структурная схема построения проектируемого узла или станции не обеспечивает требуемого качества обслуживания

---

[1] При наличии резерва простой будет иметь место только при одновременном отказе основного и резервного оборудования.

[2] При оценке телефонных потерь следует учитывать средние времена простоя только оборудования, участвующего в установлении соединения в данном направлении связи.

вызовов ни при одном из вариантов ТО. В результате такого анализа выявляется наиболее слабое звено, исследуются возможности повышения его надежности. Если в результате различных мероприятий удалось повысить надежность блоков до определенного уровня, то вновь проверяется качество обслуживания вызовов при новых параметрах надежности блока. Если оно вновь не удовлетворяет предъявляемым требованиям, то опять выбирается наиболее слабое звено в структурно-логической схеме и делается попытка улучшить его надежность Таким образом, требуемая надежность блоков оборудования определяется методом последовательного анализа структурно-логической схемы с учетом влияния отдельных блоков оборудования на качество обслуживания вызовов коммутационным узлом или станцией.

В настоящее время оптимизации сложных технических систем, в том числе и оптимизации их ТО, уделяется много внимания. В качестве целевых функций оптимизации ТО обычно принимаются удельные эксплуатационные расходы, коэффициент готовности (или простоя) блоков оборудования, параметр потока отказов, расходы на ТО, ущерб от простоя из-за отказов и т. д. При этом пользуются методами линейного программирования, итерационным методом динамического программирования и т. д., в качестве целевой функции выбирается или один из перечисленных выше параметров, или какой-либо другой параметр [25]. В принципе, оптимизация ТО, если в качестве целевой функции принимается трудоемкость ТО, не представляет трудностей при наложении ограничений на другие параметры. Однако значительный интерес представляет влияние ТО на качество обслуживания вызовов коммутационным узлом или станцией. Коммутационные узлы и станции, в свою очередь, благодаря сложной иерархичной структуре могут обеспечить требуемое качество обслуживания вызовов при нескольких вариантах их построения и различных параметрах надежности блоков оборудования разных уровней иерархии. Таким образом, решаемая нами задача — многоцелевая. Решение такой задачи известными методами без существенных ограничений весьма затруднительно, даже с использованием ЭВМ. Поэтому реальным методом решения этой задачи является прямой перебор вариантов.

3.3. Определение среднего времени ожидания ремонта

Приведенное ранее выражение для оценки среднего времени простоя блоков оборудования содержит составляющие (θ, $T_{\text{обн}}$), зависящие от особенностей узлов и станций: выбранной системы контроля работоспособности блоков оборудования, глубины охвата контролем, надежности системы контроля и т. п. Время $T_{\text{обн}}$, кроме того, зависит от квалификации обслуживающего персонала, если система контроля и сигнализации не достаточно эффективна. На длительность простоя (при централизованном варианте ТО) будет оказывать влияние также время проезда ремонтника с ЦТЭ

до отказавшего узла или станции. Эти составляющие времени простоя могут быть сравнительно легко подсчитаны или определены экспериментально. Так, $\theta=0$ при непрерывном контроле работоспособности, $\theta=T_к$ при экспоненциальном распределении периода контроля и $\theta=T_к/2$ при контроле с постоянным периодом и т. д. При оценке различных вариантов ТО по минимальному времени простоя блоков оборудования станций наибольшие трудности возникают в случае определения среднего времени ожидания ремонта $T_{ож}$.

Обычно техническое обслуживание исследуется методами теории восстановления и теории массового обслуживания (МО), которые позволяют определить требуемые вероятностные характеристики длительности обслуживания. В настоящее время еще отсутствуют решения ряда очень важных задач ТО перспективных систем. Это объясняется как сложностью этих задач, так и недостаточным вниманием, уделяемым вопросам ТО сложных технических систем. Кроме того, имеется большое количество вариантов ТО, которые представляют интерес с точки зрения их исследования и которые могут быть практически реализованы: например, вариант, когда каждый ремонтник обслуживает только оборудование определенной сложности (категории). Тогда сложную схему системы массового обслуживания (СМО) можно разделить на отдельные более простые схемы. Однако реальна и более сложная структурная схема организации ТО. Возможен вариант, когда ремонтная бригада состоит из специалистов разной квалификации. Тогда можно предположить, что специалист высшей квалификации может обслужить заявки всех видов (восстанавливать блоки любой категории), а специалист низшей квалификации — заявки только определенной категории. Возможны различные варианты и относительно потока заявок, числа их категорий и численности обслуживающего персонала. На практике может иметь место случай, например, когда ремонтник обслуживает заявки нескольких видов, определяемых категорийностью оборудования. При этом на восстановление оборудования различных категорий может быть затрачено как одинаковое, так и различное время. В одних случаях распределение длительности занятия может быть принято экспоненциальным, а в других — постоянным. Так, если предположить, что обслуживание перспективных коммутационных узлов и станций на первой фазе состоит в том, что отказавшие блоки любой категории заменяются резервными, то время их замены практически невелико, и при непрерывном обслуживании едва ли есть смысл иметь на каждой станции более одного ремонтника. В этом случае время замены мало зависит от категорийности оборудования, поскольку локализация отказавшего оборудования в системах с ЦУУ при соответствующей организации системы контроля может осуществляться с точностью до типового элемента замены (ТЭЗ) независимо от значимости блока.

Наибольший интерес представляют двухфазные варианты обслуживания, когда одной бригадой ремонтников производится за-

мена отказавших блоков (первая фаза), а второй бригадой — их восстановление (вторая фаза). В большинстве случаев в теории МО решаются специализированные задачи, поэтому использование полученных формул для оценки рассматриваемых вариантов ТО затруднительно, так как не всегда приемлемы допускаемые в них ограничения.

С точки зрения оценки различных вариантов ТО представляет интерес математическая модель, которая позволяет получить основные характеристики процесса обслуживания многоканальной системой неоднородного потока с приоритетами. При этом закон распределения времени занятости ремонтников должен быть произвольным со средним значением, отличным для заявок различного приоритета. Кроме того, следует учитывать и другие немаловажные условия, такие, как определенная периодичность работы ремонтников, многофазность и т. д.

При рассмотрении ТО как СМО следует также отметить, что на практике наиболее часто обслуживание осуществляется по принципу: первым пришел — первым обслужен, если удельная нагрузка на ремонтника не слишком велика. При большой удельной нагрузке или в системах с накоплением отказов выбор блоков для ремонта из очереди должен, по-видимому, определяться как с учетом категории, так и с учетом состояния узлов и станций (например, качества обслуживания вызовов) обслуживаемой сети.

Таким образом, наибольший интерес с точки зрения оценки вариантов ТО представляет двухфазная СМО, на каждую фазу которой поступает неоднородный поток заявок. Количество ремонтников на каждой фазе — произвольное. Время занятости ремонтников распределено по произвольному закону со средним значением, различным для заявок различного приоритета. Ремонтники могут работать как непрерывно, так и в определенные интервалы времени. Последнее требование отражает факт работы ремонтника только в течение рабочей смены и факт частичного обслуживания узлов и станций (например, только в ЧНН). Решение такой задачи аналитическими методами связано с большими трудностями. Хотя исследованиям СМО с приоритетами в последнее время начинает уделяться все большее внимание, однако широкий класс задач, особенно для многолинейных СМО с динамическим приоритетом, еще не решен.

Рассмотрим один из однофазных вариантов ТО сети, состоящей из n равноудаленных от ЦТЭ узлов и станций, содержащих оборудование c категорий. При поступлении сигнала об отказе с некоторого узла или станции один из свободных ремонтников, находящихся на ЦТЭ, выезжает на эту станцию для устранения отказа. Предположим, что время проезда до станции и обратно есть величина постоянная и равная $2T_{пр}$, а время восстановления распределено по показательному закону с параметром $\mu_э = 1/T_в$. После устранения отказа ремонтник возвращается на ЦТЭ. С точки зрения СМО имеем многолинейную систему, на вход которой поступает неоднородный (обслуживание производится с приорите-

том) поток заявок. Функция распределения времени занятости одного ремонтника с учетом времени переезда будет иметь вид

$$B(y)=\begin{cases}0, & y<2T_{\text{пр}},\\ 1-\exp\{-\mu_{\text{э}}(y-2T_{\text{пр}})\}, & y\geqslant 2T_{\text{пр}}\end{cases}$$

или

$$B_{\text{с}}(y)=1-B(y)=\begin{cases}1, & y<2T_{\text{пр}},\\ \exp\{-\mu_{\text{э}}(y-2T_{\text{пр}})\}, & y\geqslant 2T_{\text{пр}}.\end{cases}$$

Интенсивность обслуживания одним ремонтником будет равна

$$\mu=\left[\int_0^{\infty}B_{\text{с}}(y)\,dy\right]^{-1}=\left(2T_{\text{пр}}-\frac{1}{\mu_{\text{э}}}\right)^{-1}.$$

Пусть $H(y)$ — функция распределения времени обслуживания системой из r каналов (ремонтников) или вероятность того, что все каналы (ремонтники) заняты в течение времени, превышающего y. С некоторым допущением можно предположить, что

$$H(y)=\left[\mu\int_0^{\infty}B_{\text{с}}(x)\,dx\right]^{r-1}B_{\text{с}}(y)=$$

$$=\begin{cases}(1-\mu y)^{r-1}, & y<2T_{\text{пр}},\\ (1-2\mu T_{\text{пр}})^{r-1}\exp\{c\,\mu_{\text{э}}(y-2T_{\text{пр}})\}, & y\geqslant 2T_{\text{пр}}.\end{cases}$$

Среднее время ожидания обслуживания для заявок p-го приоритета в многоканальной системе с произвольным временем обслуживания, распределенным по одинаковому закону с параметром μ, будет равно [26]

$$T_{\text{ож}(p)}=\frac{E[T_0]}{\left(1-\frac{1}{r\mu}\sum_{i=1}^{p-1}\omega_i\right)\left(1-\frac{1}{r\mu}\sum_{i=1}^{p}\omega_i\right)},$$

где T_0 — время, необходимое для окончания обслуживания требования, уже находящегося на обслуживании, а $E[T_0]$ — его среднее значение, которое может быть определено из соотношения

$$E[T_0]=P(\gamma>0)\,Q=\frac{P_r}{1-\rho}Q,$$

где $\rho=\sum_{i=1}^{c}\omega_i/r\mu$ — удельная нагрузка на одного ремонтника; P_r — вероятность того, что все ремонтники заняты обслуживанием; ω_i — параметр потока отказов оборудования i-й категории. Значение Q может быть определено из выражения

$$Q=M[y^2]/2M[y],$$

где

$$M[y^2]=2\int_0^{\infty}dx\int_0^{\infty}\Phi(x+y)\,dy=$$

$$= 2\left\{\int_0^{2T_{\text{пр}}} dx\left[\int_0^{2T_{\text{пр}}}[1-\mu(x+y)]^{r-1}\,dy+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\int_{2T_{\text{пр}}-x}^{\infty}(1-2T_{\text{пр}})^{r-1}\exp\{-r\,\mu_{\text{э}}(x+y-2T_{\text{пр}})\}\,dy\right]+\right.$$

$$+\int_{2T_{\text{пр}}}^{\infty} dx\int_0^{\infty}(1-\mu\,2T_{\text{пр}})^{r-1}\exp\{-r\,\mu_{\text{э}}(x+y-2T_{\text{пр}})\}\,dy=$$

$$=\frac{2}{r(r-1)\mu^2}\left[1+\frac{1}{r}\left(\frac{\mu}{\mu_{\text{э}}}\right)^{r+1}\right];$$

Таблица 3.1

Номер категории	Расчет по формулам	Моделирование	
	$T_{\text{ож}}$, ч	$T_{\text{ож}}$, ч, D—дисперсия	
	$r=1$	$\mu=0{,}75$ ч$^{-1}$	
1	0,85	0,96	0,012
2	0,96	1,00	0,05
3	0,99	0,97	0,03
4	1,02	0,97	0,07
5	1,05	1,09	0,03
6	1,33	1,32	0,01
7	2,13	2,14	0,02
	$r=2$	$\mu=0{,}5$ ч$^{-1}$	
1	0,18	0,22	0,006
2	0,20	0,17	0,02
3	0,20	0,19	0,01
4	0,21	0,22	0,03
5	0,21	0,23	0,01
6	0,24	0,27	0,01
7	0,31	0,35	0,01

$$M[y]=\int_0^{\infty} H(y)\,dy = 1/r\,\mu.$$

Тогда

$$Q=\frac{1}{(r+1)\mu}\left[1+\frac{1}{r}\left(\frac{\mu}{\mu_{\text{э}}}\right)^{r+1}\right].$$

Таким образом, получены все составляющие, необходимые для расчета $T_{\text{ож}(p)}$. Среднее время простоя блока p-й категории будет равно

$$T_{\text{п}\,(p)}=\theta+T_{\text{обн}}+T_{\text{пр}}+T_{\text{в}}+T_{\text{ож}\,(p)}.$$

В табл. 3.1 приводятся в качестве примера среднее время ожидания восстановления оборудования различных категорий, рассчитанное по приведенной выше методике, и время ожидания, полученное посредством статистического моделирования процесса ТО на ЭВМ. Расчет производился для значений параметра потока отказов, близких к реальным, для коммутационных узлов и станций электронного типа. Для упрощения θ и $T_{\text{обн}}$ полагались равными нулю. Расчеты были проведены на основании следующих исходных данных: число категорий блоков оборудования — 7; количество блоков оборудования данной категории — 1; параметры потока отказов блоков оборудования различных категорий: $\omega_1 = 5\cdot10^{-3}$ ч$^{-1}$; $\omega_2 = 2{,}47\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$; $\omega_3 = 8{,}24\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$; $\omega_4 = 1{,}48\cdot10^{-4}$ ч$^{-1}$; $\omega_5 = 1{,}1\cdot10^{-3}$ ч$^{-1}$; $\omega_6 = 6{,}58\times\times10^{-3}$ ч$^{-1}$; $\omega_7 = 6{,}77\cdot10^{-3}$ ч$^{-1}$; число узлов и станций — 10; время проезда от ЦТЭ до станции и обратно — 1 ч.

Сравнение результатов расчета по формулам с результатами моделирования показывает достаточно хорошую их сходимость.

Недостатком приведенной выше методики является то, что она не учитывает различное удаление узлов и станций от ЦТЭ и предполагает одинаковое время ремонта блоков различных категорий. Эти допущения позволяют получить только средние оценки по всем станциям обслуживаемой сети. Усреднение времени восстановления по категориям оборудования будет вносить тем меньшую погрешность, чем выше степень унификации блоков оборудования и полнее система контроля их работоспособности. Еще одним недостатком приведенной методики является то, что она не позволяет учесть частичное обслуживание (например, в ЧНН) узлов и станций.

Получение аналитических выражений, позволяющих учитывать всевозможные особенности ТО коммутационных узлов и станций, связано со значительными трудностями. Поэтому при решении таких задач большое внимание уделяется методу статистического моделирования на ЭВМ.

На рис. 3.1 приведена упрощенная схема алгоритма, моделирующего процесс однофазного технического обслуживания совокупности узлов и станций из ЦТЭ. Поток отказов предполагается простейшим, время ремонта блока j-й категории считается распределенным по экспоненциальному закону[1] с параметром μ_j. Работа ремонтников осуществляется посменно, т. е. для каждого фиксируется некоторый интервал времени суток длительностью 8 часов: 0—8 час. — первая смена, 8—16 час. — вторая смена, 16—24 час. — третья смена. Однако, если конец смены, в которую начато восстановление оборудования (началом восстановления считается момент выезда с ЦТЭ), приходится на время ремонта, ремонт не прерывается. В этом случае вычисляется время переработки и ремонтнику предоставляется «отгул», равный переработанному времени.

При моделировании вычисляются следующие параметры системы ТО:

среднее время ожидания начала обслуживания по всем отказам и только по ожидавшим (по станциям и категориям) T_{ij};

среднеквадратическое отклонение оценки среднего времени ожидания;

суммарное время ремонта (без учета времени переезда) блока j-й категории i-й станции;

время переезда;

суммарное время восстановления блока j-й категории i-й станции C_{ij};

время переработки.

Исходными данными для программы моделирования являются:

1) число станций n;

2) число категорий оборудования на каждой станции m;

3) число ремонтников r;

4) матрица интенсивностей отказов $\|\omega_{ij}\|_{n\times m}$;

5) вектор интенсивностей ремонта $\|\mu_i\|_{1\times m}$;

6) вектор, задающий распределение ремонтников по сменам, $\|\mathrm{CM}_p\|_{1\times r}$, где CM_p — номер смены, в которую работает p-й ремонтник;

7) координаты расположения телефонных станций (x_i, y_i), $i=0, r$, где (x_0, y_0) — координаты ЦТЭ, или вектор расстояний $\|l_i\|_{1\times n}$, где l_i — расстояние от ЦТЭ до i-й телефонной станции;

8) скорость передвижения ремонтника v;

9) длительность интервала анализа T_a.

При составлении алгоритма пользовались следующими обозначениями:

τ_p — время освобождения p-го ремонтника;

---

[1] При статистическом моделировании не представляет особых трудностей задание любых законов распределения параметра потока заявок и времени занятия обслуживающих приборов.

s, k — текущее значение номера станции и категории оборудования соответственно;

t_0 — время ожидания начала ремонта;

N_{sk} — число отказов оборудования s-й станции k-й категории;

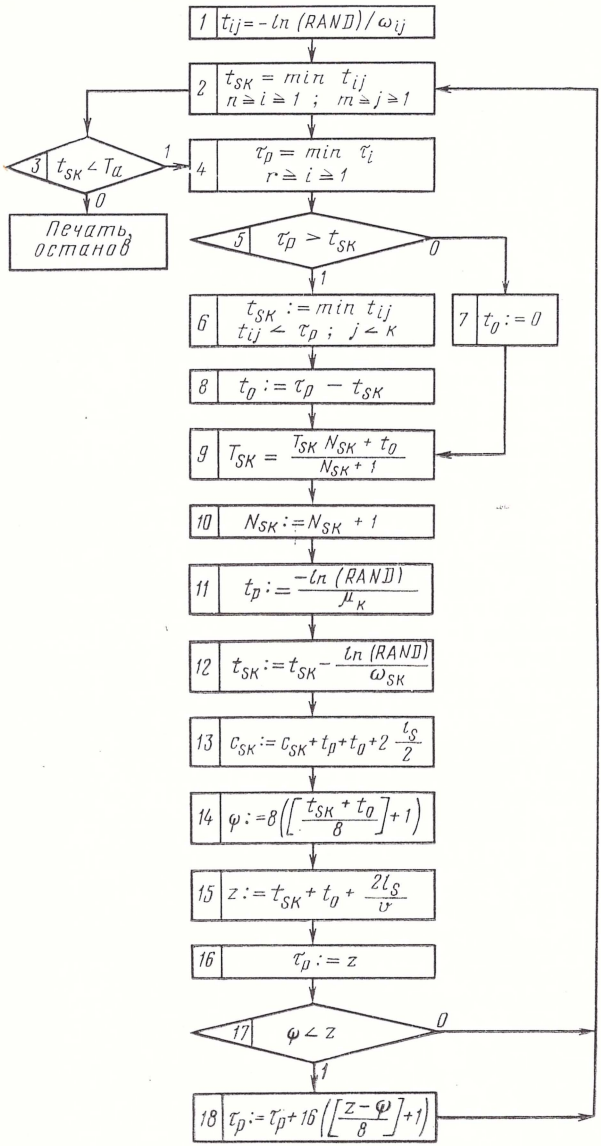

Рис. 3.1

μ_k — интенсивность восстановления оборудования k-й категории;

ω_{sk} — интенсивность отказа оборудования s-й станции k-й категории;

C_{sk} — счетчик текущего времени восстановления;

l_s — расстояние от ЦТЭ до s-й станции;

ψ — время окончания смены;

z — время окончания ремонта;

T_{sk} — текущее значение среднего времени ожидания начала $i=\overline{0,\ r}$ восстановления.

На рис. 3.1 показаны следующие операторы:

1 — оператор определения моментов первого отказа и формирования матрицы отказов;

2 — оператор выбора ближайшего момента отказа $\min t_{ij}$;

3 — оператор, проверяющий принадлежность момента отказа $\min t_{ij}$ заданному интервалу времени T_a;

4 — оператор выбора ремонтника с минимальным временем освобождения;

5 — оператор сравнения времени освобождения ремонтника с временем ближайшего момента отказа;

6 — оператор, определяющий из совокупности всех отказов отказы блоков более высокой категории;

7 — оператор, осуществляющий «зануление» времени ожидания ремонта t_o;

8 — оператор, вычисляющий время ожидания начала восстановления;

9 — оператор, определяющий среднее время ожидания по всем отказам;

10 — оператор определения числа отказов;

11 — оператор определения времени ремонта;

12 — оператор определения времени следующего отказа;

13 — оператор определения времени восстановления с учетом времени ожидания, ремонта и проезда;

14 — оператор определения времени окончания рабочей смены;

15 — оператор определения времени окончания ремонта;

16 — оператор определения времени освобождения p-го ремонтника;

17 — оператор сравнения времени окончания смены и времени окончания ремонта.

В табл. 3.2 приведены значения времени ожидания и простоя блоков оборудования узлов и станций при различном числе ремонтников и интенсивности восстановления. Моделирование производилось для тех же исходных данных, что и при расчете данных табл. 3.1. Значения 0 и $T_{\text{обн}}$ полагались равными 0. Кроме того, в выбранном при моделировании примере для простоты предполагалось, что все узлы и станции одинаковы. Одинаковыми являются и направления связи на каждом узле или станции. В последней колонке таблицы приводятся значения телефонных потерь в фиксированном направлении связи на любой из станций, определяемые по (2.22). Значения $P\{з/i\}$ были получены методом статистического моделирования при непрерывном контроле работоспособности блоков оборудования для коммутационного узла с пространственно-временной коммутацией каналов.

Более перспективной представляется двухфазная система ТО, отличающаяся от рассмотренной выше только тем, что на ЦТЭ имеется мастерская для восстановления отказавших блоков. В этом случае роль ремонтников на первой фазе сводится к доставке на станцию исправного блока оборудования требуемой категории, замене неисправного и доставке отказавшего блока в мастерскую. Предполагается наличие некоторого запаса исправных блоков (ЗИП), который расходуется по мере устранения отказов на станциях и пополняется по мере восстановления неисправных блоков в мастерской. В данной системе ожидание начала восстановления будет иметь место при отсутствии свободного ремонтника, который мог бы доставить исправный блок на отказавшую станцию, и при отсутствии в ЗИП работоспособного блока требуемой категории.

На рис. 3.2 приведена упрощенная схема алгоритма, моделирующего двухфазный вариант системы ТО, где:

1 — оператор определения моментов первого отказа блоков, формирование матрицы отказов;

2 — оператор выбора ближайшего момента отказа;

3 — оператор, проверяющий принадлежность выбранного момента отказа интервалу времени T_a;

Таблица 3.2

r_1	μ	Категория 1		Категория 2		Категория 3		Категория 4		Категория 5		Категория 6		Категория 7		Средние телефонные потери p, ‰
		$T_{ож}$	$T_{п}$	$T_{ож}$	$T_{п}$	$T_{ож}$	$T_{п}$	$T_{ож}$	$T_{п}$	$T_{ож}$	$T_{п}$	$T_{ож}$	$T_{п}$	$T_{ож}$	$T_{п}$	
1	0,50	1,85	4,34	1,89	4,39	1,95	4,45	2,16	4,66	2,12	4,62	2,09	5,41	6,05	8,55	6,2
1	0,75	0,96	2,76	1,01	2,80	0,97	1,77	0,97	1,77	1,09	2,89	1,32	3,12	2,14	3,94	6,6
1	2,00	0,30	1,30	0,31	1,31	0,28	1,28	0,14	1,14	0,29	1,29	0,35	1,35	0,46	1,46	5,6
1	3,00	0,22	1,05	0,25	1,08	0,25	1,07	0,17	1,00	0,26	1,09	0,27	1,1	0,34	1,17	5,4
2	0,25	0,92	5,42	0,87	5,37	0,93	5,40	0,97	5,47	1,00	5,50	1,33	5,83	2,39	6,89	9,6
2	0,50	0,23	2,73	0,17	2,67	0,19	2,69	0,22	2,72	0,23	2,73	0,23	2,77	0,36	2,86	6,9
2	0,75	0,12	1,91	0,07	1,87	0,09	1,89	0,06	1,86	0,10	1,89	0,12	1,92	0,15	1,95	6,1
2	2,00	0,03	1,00	0,01	1,01	0,03	1,03	0,02	1,02	0,03	1,03	0,03	1,03	0,03	1,03	5,3
2	3,00	0,02	0,85	0,02	0,85	0,01	0,85	0,00	0,83	0,03	0,86	0,02	0,85	0,03	0,86	5,2
3	0,25	0,19	4,69	0,14	4,64	0,20	4,70	0,20	4,70	0,17	4,67	0,23	4,72	0,32	4,83	8,8
3	0,50	0,05	2,55	0,02	2,52	0,03	2,52	0,02	2,52	0,03	2,53	0,04	2,55	0,05	2,55	6,7
3	0,75	0,02	1,82	0,01	1,80	0,01	1,81	0,004	1,80	0,02	1,82	0,02	1,82	0,02	1,82	6,1
3	2,00	0,006	1,00	0,007	1,00	0,009	1,01	0,000	1,00	0,000	1,00	0,005	1,00	0,006	1,00	5,3
3	3,00	0,004	0,84	0,000	0,83	0,007	0,84	0,000	0,83	0,000	0,83	0,004	0,84	0,004	0,84	5,2

4 — оператор выбора минимального времени освобождения ремонтника на первой фазе ($h_j=1$) и второй фазе ($h_j=2$);

5 — оператор сравнения времени освобождения ремонтника с минимальным временем отказа;

6 — оператор, проверяющий наличие свободного ремонтника на фазе;

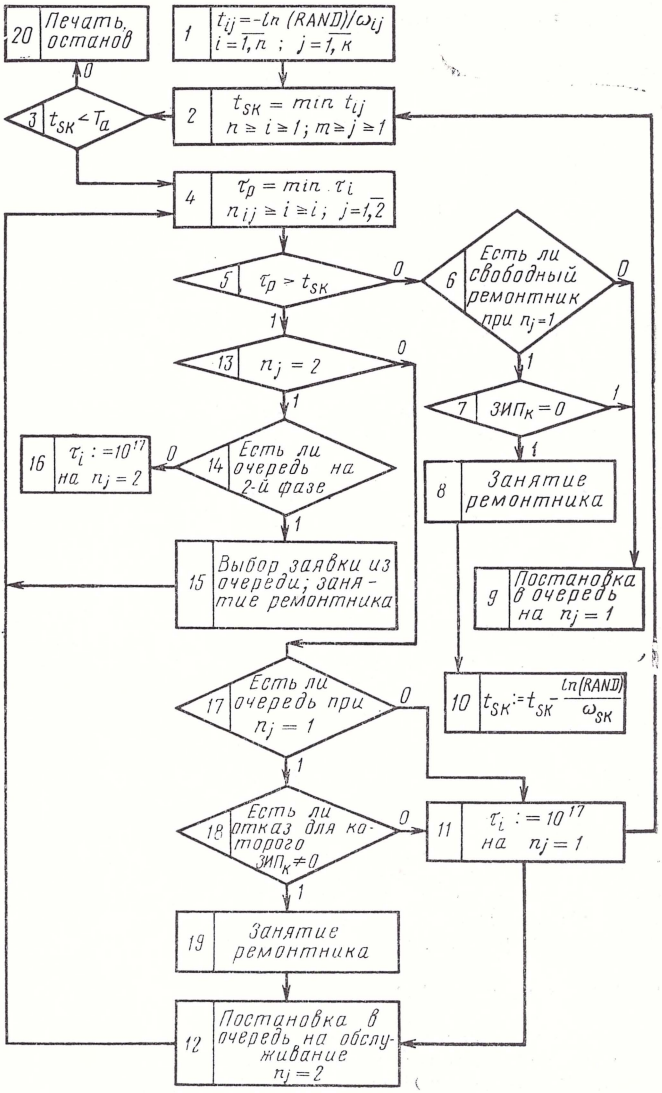

Рис. 3.2

7 — оператор, проверяющий наличие запасного блока данной категории;

8 — оператор, отмечающий занятие ремонтника;

9 — оператор, отмечающий постановку в очередь на ремонт в первой фазе;

10 — оператор вычисления нового времени отказа;

11 — оператор засылки в ячейку специального признака освобождения ремонтника;

12 — оператор постановки в очередь на обслуживание во второй фазе;

13 — оператор определения фазы обслуживания;

14 — оператор определения наличия очереди на обслуживание;

15 — оператор выбора из очереди по определенному признаку заявки на обслуживание;

16 — оператор засылки в ячейку специального признака освобождения ремонтника;

17 — оператор проверки наличия очереди в первой фазе;

18 — оператор проверки наличия соответствующего ЗИП;

19 — оператор, отмечающий занятие ремонтника;

20 — оператор выдачи на печать результатов моделирования и останова ЭВМ.

Работа на первой фазе предполагается посменной при произвольном числе ремонтников в каждую смену. Восстановление блоков в мастерской ЦТЭ (вторая фаза) производится непрерывно при произвольном числе ремонтников.

Система ТО при двухфазном варианте оценивается по тем же параметрам, что и при однофазном. В этом случае к вышеприведенным исходным данным моделирования однофазной системы добавляются:

1) число обслуживающих ремонтников во второй фазе r_2;

2) вектор интенсивности восстановления на второй фазе $\|\mu_2\|_{1\times m}$;

3) начальный запас исправных блоков [ЗИП].

В табл. 3.3 приведены значения времени ожидания и простоя блоков оборудования при различном числе ремонтников на первой (r_1) и второй (r_2) фазах обслуживания. Интенсивность восстановления на второй фазе выбрана одинаковой для блоков всех категорий и равной $\mu=1$ ч$^{-1}$. Время замены отказавшего блока оборудования на первой фазе полагается достаточно малым по сравнению с временем проезда ремонтника до станции и обратно. Остальные исходные данные такие же, как и при моделировании однофазного варианта. Время простоя блока j-й категории при данном варианте ТО определяется по формуле

$$T_{\text{п}\,j}=T_{\text{пр}}+T_{\text{ож}\,j}.$$

В табл. 3.3 приводятся значения телефонных потерь для каждого варианта, полученные аналогично однофазному варианту.

Рассмотрим пример выбора варианта ТО при заданных параметрах потока отказов блоков оборудования, допустимой трудоемкости ТО. Предполагается, что ремонтники работают круглосуточно в три смены. Пусть в результате расчета получено, что $R=9$. Узлы и станции имеют такие же параметры, как и при вычислении табл. 3.1 и 3.2. Предполагается, что интенсивность восстановления при однофазном варианте $\mu\leqslant 3$. Допустимые телефонные потери должны быть $p_{\text{доп}}=5‰$.

При однофазном варианте ТО из табл. 3.2 находим, что наиболее близкий результат ($p=5{,}2‰$) получается при $r=3$ и $\mu=3$. Таким образом, ясно, что для обеспечения требований к качеству обслуживания вызовов необходимо или увеличивать каким-либо образом интенсивность восстановления или выбирать другой вариант ТО. При двухфазном варианте ТО (табл. 3.2) $p\leqslant p_{\text{доп}}$ наблюдается при многих вариантах, когда количество запасных блоков для каждой категории $[\text{ЗИП}]_i\geqslant 2$. Кроме того, требования к p выполняются и при $r_1+r_2=2$ при объеме ЗИП$\geqslant 2$.

Таким образом, ясно, что при двухфазном варианте есть возможность обеспечить требуемое качество обслуживания вызовов коммутационными узлами и станциями при $H_p<H_{\text{рдоп}}$. При этом необходимо оценить возможность и целесообразность наличия получаемого по расчетам ЗИП.

№ категории	Кол-во ЗИП	$T_{ож}$	$T_п$	Кол-во ЗИП	$T_{ож}$	$T_п$	Кол-во ЗИП	$T_{ож}$	$T_п$	Кол-во ЗИП	$T_{ож}$	$T_п$
	$r_1=1,\ r_2=1,\ p=5{,}5°/_{oo}$			$r_1=1, r_2=2, p=5{,}38\%$			$r_1=2,\ r_2=1,\ p=5{,}3°/_{oo}$			$r_1=2,\ r_2=2,\ p=5{,}3°/_{oo}$		
1	1	1,59	2,09	1	1,19	1,69	1	1,55	2,15	1	1,17	1,67
2	1	0,18	0,68	1	0,17	0,67	1	0,08	0,58	1	0,09	0,59
3	1	0,26	0,76	1	0,20	0,70	1	0,11	0,61	1	0,14	0,64
4	1	0,12	0,62	1	0,12	0,62	1	0,04	0,54	1	0,01	0,61
5	1	0,33	0,84	1	0,28	0,78	1	0,22	0,72	1	0,18	0,68
6	1	2,65	3,15	1	2,06	2,66	1	2,65	3,15	1	2,03	2,53
7	1	3,05	3,54	1	2,30	2,30	1	3,01	3,61	1	2,04	2,53
	$r_1=1, r_2=1, p=5{,}0°/_{oo}$			$r_1=1,\ r_2=1,\ p=4{,}98°/_{oo}$			$r_1=1, r_2=1, p=4{,}9°/_{oo}$			$r_1=1, r_2=1, p=4{,}88°/_{oo}$		
1	2	0,21	0,71	2	0,14	0,64	2	0,13	0,63	2	0,13	0,54
2	2	0,12	0,62	2	0,11	0,61	2	0,01	0,51	2	0,01	0,51
3	2	0,11	0,61	2	0,12	0,62	2	0,02	0,53	2	0,03	0,51
4	2	0,13	0,63	2	0,11	0,61	2	0,01	0,51	2	0,01	0,51
5	2	0,13	0,63	2	0,11	0,61	2	0,01	0,51	2	0,06	0,51
6	2	0,36	0,86	2	0,19	0,69	2	0,23	0,73	2	0,23	0,57
7	2	0,43	0,93	2	0,22	0,71	2	0,27	0,77	2	0,27	0,57
	$r_1=1,\ r_2=1$ $p=5{,}1°/_{oo}$			$r_1=1,\ r_2=1,$ $p=5\ ^{8}/_{oo}$			$r_1=1,\ r_2=1,$ $p=4{,}87°/_{oo}$			$r_1=1,\ r_2=2,$ $p=4{,}91°/_{oo}$		
1	2	0,22	0,72	2	0,15	0,65	3	0,03	0,53	3	0,007	0,51
2	1	0,12	0,62	1	0,12	0,62	3	0,01	0,51	2	0,008	0,51
3	1	0,33	0,83	1	0,21	0,71	3	0,01	0,51	2	0,006	0,51
4	1	0,20	0,70	1	0,13	0,63	3	0,01	0,51	1	0,02	0,52
5	1	0,29	0,79	1	0,25	0,75	3	0,01	0,51	1	0,20	0,69
6	2	0,35	0,85	2	0,19	0,70	3	0,06	0,56	2	0,07	0,57
7	2	0,46	0,96	2	0,22	0,72	3	0,10	0,61	2	0,07	0,57
	$r_1=1,\ r_2=2,$ $p=5{,}05°/_{oo}$			$r_1=1,\ r_2=2,$ $p=0{,}5°/_{oo}$			$r_1=1,\ r_2=2,$ $p=5°/_{oo}$			$r_1=1,\ r_2=2,$ $p=4{,}87°/_{oo}$		
1	3	0,13	0,63	3	0,11	0,61	2	0,15	0,65	3	0,007	0,5
2	2	0,12	0,62	2	0,13	0,62	1	0,09	0,59	3	0,008	0,51
3	2	0,11	0,64	2	0,11	0,61	1	0,15	0,65	3	0,007	0,51
4	1	0,14	0,64	1	0,14	0,64	1	0,05	0,55	3	0,007	0,51
5	1	0,34	0,84	1	0,28	0,78	1	0,24	0,74	3	0,006	0,51
6	2	0,34	0,84	2	0,19	0,69	2	0,23	0,79	3	0,01	0,51
7	2	0,46	0,97	2	0,21	0,71	2	0,31	0,81	3	0,01	0,51

Глава 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТЕЙ СВЯЗИ ПО ЭКОНОМИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ

4.1. Общие положения

Определение оптимальной надежности элементов сетей связи по экономическому критерию может быть произведено одним из двух методов: по минимуму суммарных народнохозяйственных затрат и потерь, зависящих от надежности элементов сетей связи; по максимуму отдачи на вложенные средства, зависящие от надежности элементов сетей связи.

Оба метода можно применять при проектировании и в процессе эксплуатации для определения конкретных оптимальных уровней надежности элементов сетей связи. Кроме того, этими методами можно пользоваться для определения оптимальной кратности резервирования оборудования при обеспечении надежности путем резервирования.

Методика нахождения оптимальной надежности элементов сетей связи базируется на сопоставлении различных вариантов обеспечения надежности элементов сетей связи. Число вариантов, которые необходимо рассматривать при определении оптимальной надежности элементов сетей связи, как правило, невелико, поэтому целесообразно использовать метод прямого перебора.

Оптимальная надежность элементов сетей связи по минимуму суммарных затрат и потерь, зависящих от надежности элементов сетей связи, зависит от способа обеспечения надежности.

Основными способами повышения надежности элементов сетей связи, воздействующими на их безотказность, являются резервирование и применение деталей повышенной надежности. При резервировании повышение надежности элементов сетей связи не вызывает увеличения срока их службы, так как основные и резервные элементы по конструкции одинаковы. Период эксплуатации элементов сетей связи при различных вариантах обеспечения надежности методом резервирования одинаков. Поэтому сопоставление затрат и потерь при различных вариантах можно производить по абсолютным данным за весь период эксплуатации или приведенным к году эксплуатации при одинаковом периоде эксплуатации ($T_э$) во всех вариантах. При применении деталей повышенной надежности срок службы элементов сетей связи возрастает. В различных вариантах обеспечения надежности этим методом период эксплуатации элементов сетей связи будет различным. С целью сопоставимости вариантов в этом случае необходимо рассматривать не абсолютные данные затрат и потерь, за-

висящих от надежности, за весь период эксплуатации, а удельные затраты и потери, приходящиеся на год эксплуатации элементов сетей связи, при различных периодах эксплуатации ($T_э$) в вариантах.

Таким образом, при резервировании оптимальная надежность элементов сетей связи с экономической точки зрения соответствует такой величине, при которой суммарные затраты, зависящие от надежности этих элементов, а также потери предприятий связи и потребителей услуг связи из-за отказов элементов сетей связи за весь период эксплуатации (или приведенные к году эксплуатации) минимальны. При применении деталей повышенной надежности оптимальная надежность элементов сетей связи соответствует такой величине, при которой суммарные удельные затраты на элементы сетей связи, зависящие от их надежности, а также потери предприятий связи и потребителей услуг связи из-за отказов элементов сетей связи, приходящиеся на год эксплуатации, минимальны.

Оптимальный вариант обеспечения надежности элементов сетей связи выбирается с учетом интересов народного хозяйства в целом. При определении оптимального варианта в основу принимается минимум народнохозяйственных затрат (капитальных и эксплуатационных), связанных с производством и использованием элементов сетей связи, приведенных в сопоставимый вид, а также потерь, вызванных недостаточной надежностью этих элементов. Сопоставимость вариантов по качеству, в частности по надежности, обеспечивается добавлением к затратам по каждому варианту определенной величины потерь предприятий связи и потребителей услуг связи. Величина потерь отражает степень надежности рассматриваемых элементов сетей связи по вариантам. Чем выше степень надежности оборудования, тем меньшая величина потерь добавляется, и наоборот. Следовательно, приведение вариантов в сопоставимый вид при помощи коэффициентов эквивалентности, отражающих изменение надежности по вариантам, дополнительно не требуется. При повышении надежности элементов сетей связи любым способом изменяются не все виды затрат. Поэтому при сравнении вариантов обеспечения надежности элементов сетей связи во внимание могут приниматься лишь те затраты, величина которых меняется по вариантам.

Составляющие затрат и потерь, учитываемые по вариантам при определении оптимальной надежности элементов сетей связи, при повышении их надежности методом резервирования или применением деталей повышенной надежности одинаковы. Различие заключается в методе приведения затрат и потерь по вариантам в сопоставимый вид. Наиболее реальным путем повышения надежности элементов сетей связи и наиболее простым для практического выполнения является резервирование. Поэтому методика нахождения оптимальной надежности элементов сетей связи рассматривается подробно для этого способа.

4.2. Определение оптимальной надежности элементов сетей связи по минимуму затрат и потерь

При повышении надежности элементов сетей связи резервированием условие, при котором достигается оптимальная надежность элемента сети связи по экономическому критерию, при суммировании затрат и потерь за весь период эксплуатации элемента сети связи может быть представлено в общем виде следующей формулой:

$$З\Pi_{T_э} = K + \sum_{i=1}^{n} K_{к.р\,i} + \sum_{t=1}^{T_э} Э_t + \sum_{t=1}^{T_э} П_t = \min, \qquad (4.1)$$

где $З\Pi_{T_э}$ — суммарные затраты и потери, зависящие от надежности элементов сетей связи, за период их эксплуатации ($T_э$) в рассматриваемом варианте обеспечения надежности элемента сети связи; K — капитальные затраты на элемент сети связи; $\sum_{i=1}^{r} K_{к.р\,i}$ — затраты на капитальный ремонт элемента сети связи за период его эксплуатации $T_э$; $\sum_{t=1}^{T_э} Э_t$ — суммарные эксплуатационные расходы на элемент сети связи, зависящие от его надежности, за период эксплуатации $T_э$; $\sum_{t=1}^{T_э} П_t$ — суммарные потери предприятий связи и потребителей услуг связи из-за отказов элемента сети связи за период его эксплуатации $T_э$.

При необходимости могут быть введены ограничения по качеству обслуживания вызовов, трудоемкости технического обслуживания и капитальным затратам. Оптимальным вариантом в этом случае будет такой, в котором обеспечивается минимум затрат и потерь, зависящих от надежности элементов сетей связи, при условии, что качество обслуживания вызовов на сети не будет ниже допустимого (вследствие ненадежности рассматриваемого элемента сети), трудоемкость технического обслуживания элемента сети не будет выше допустимой, а капитальные затраты не превысят установленной нормативной величины.

Величина затрат и потерь, входящих в (4.1), зависит либо от параметра потока отказов элемента сети связи ω, либо от интенсивности его восстановления μ, либо от обоих параметров. Комплексное отражение эти параметры находят в коэффициенте простоя ($K_п$). Поэтому в качестве показателя надежности при определении оптимальной надежности элементов сетей связи целесообразно принять коэффициент их простоя как наиболее приемлемый показатель для рассматриваемых условий. В этом показателе учитывается изменение надежности элементов сетей связи как за счет увеличения безотказности, так и за счет улучшения ремонтопригодности, что очень важно для восстанавливаемых элементов сетей связи. Методика расчета коэффициентов простоя элемен-

тов сетей связи при повышении их надежности способом резервирования изложена в гл. 1. Для расчета коэффициентов простоя различных вариантов обеспечения надежности конкретных элементов сетей связи при резервировании необходимо располагать данными о параметре потока отказов ω исходного уровня надежности элементов сетей связи и интенсивности их восстановления (μ), т. е. варианта без резервирования. Эти сведения могут быть получены на основании статистических наблюдений за отказами оборудования на эксплуатационных предприятиях связи или на основании данных предприятий, разрабатывающих оборудование, являющееся элементами сетей связи.

На основе данных о коэффициентах простоя ($K_{\text{п}}$) для каждого из вариантов обеспечения надежности определяется среднее время простоя конкретных элементов, необходимое для расчета отдельных видов затрат и потерь: $t_{\text{п}T_{\text{э}}} = 8760\ K_{\text{п}}T_{\text{э}}$ — за период эксплуатации; $t_{\text{п.год}} = 8760\ K_{\text{п}}$ — за год, где 8760 — количество часов возможной работы элементов сети связи за год.

Рассмотрим подробно составляющие затрат и потерь формулы (4.1) и методику их расчета.

Капитальные затраты. Для определения капитальных затрат на элементы сетей составляются сметы на оборудование на основе оптовых цен (эти затраты можно рассматривать как затраты на разработку и производство оборудования, которые, как правило, находят адекватное отражение в его цене). Кроме того, в смету включаются расходы на тару и упаковку, транспортные расходы, заготовительно-складские расходы, наценки Главснаба, расходы на монтаж и регулировку оборудования, плановые накопления. При составлении смет необходимо пользоваться действующими прейскурантами оптовых цен и ценниками на монтаж оборудования. В каждом из вариантов обеспечения надежности элементов сетей связи капитальные затраты зависят от количества основного (N) и резервного ($N_{\text{рез}}$) оборудования и капитальных затрат на один основной $K_{\text{о}}$ и резервный $K_{\text{р}}$ комплекты оборудования и определяются их суммой:

$$K = K_{\text{о}}N + K_{\text{р}}N_{\text{рез}}.$$

При повышении надежности методом нагруженного резервирования капитальные затраты на один основной и резервный комплекты оборудования одинаковы. При повышении надежности методом скользящего ненагруженного резервирования съемными блоками и платами (см. гл. 1) капитальные затраты на один резервный комплект меньше, чем на основной, на величину затрат на монтаж и регулировку и плановых накоплений.

Затраты на капитальный ремонт. За весь период эксплуатации затраты на капитальный ремонт элементов сетей $\sum_{i=1}^{n} K_{\text{к.р}\,i}$ зависят от количества капитальных ремонтов (n) и затрат на капитальный ремонт элемента $K_{\text{к.р}}$. При повышении надежности элементов сетей связи способом резервирования межремонтные пе-

риоды не сокращаются, а увеличивается количество оборудования, подлежащего капитальному ремонту. Следовательно, стоимость капитального ремонта элемента сетей при повышении надежности методом резервирования будет увеличиваться. Предполагаемую величину стоимости каждого капитального ремонта за период эксплуатации определить довольно трудно. Затраты на капитальный ремонт элементов сетей за весь период эксплуатации по каждому варианту обеспечения надежности можно определить достаточно точно исходя из величины капитальных затрат на элемент сети связи по рассматриваемому варианту обеспечения надежности K, норм на амортизационные отчисления в год $H_а$, периода эксплуатации элементов сетей связи $T_э$ по формуле

$$\sum_{t=1}^{T_э} K_{к.р\,t} = K H_а T_э,$$

где $K_{к.р\,t}$ — затраты на капитальный ремонт элементов сетей связи, приходящиеся на год их эксплуатации.

Суммарные эксплуатационные расходы. За весь период эксплуатации элементов сетей суммарные эксплуатационные расходы $\sum_{t=1}^{T_э} Э_t$ включают в себя только те затраты, величина которых непосредственно зависит от их надежности. Уровнем надежности элементов сетей связи, повышение которого достигается способом резервирования, определяются:

затраты рабочего времени работников при устранении отказов в элементах сетей;

время проведения профилактических работ и текущего ремонта (при профилактическом методе обслуживания элементов сетей) или время выполнения контрольных наблюдений за работой элементов сетей и анализа этих наблюдений (при восстановительном методе обслуживания);

расход материалов и запасных частей, необходимых для текущего ремонта и устранения отказов в элементах сетей связи;

расход производственной электроэнергии (при нагруженном резервировании).

Это влияние находит отражение в соответствующих статьях эксплуатационных расходов, которые учитываются в каждом варианте обеспечения надежности элементов сетей связи. В эксплуатационные расходы включаются:

1. Заработная плата работников за время обнаружения и устранения отказов, за весь период эксплуатации оборудования ($T_э$) с учетом дополнительных выплат, премиального фонда и отчислений органам социального страхования $\sum_{t=1}^{T_э} Э'_{з.п\,t}$, где $Э'_{з.п\,t}$ — заработная плата, начисляемая работникам, устраняющим отказы в элементах сетей связи на t-м году его эксплуатации. Эта составляющая зависит от средней часовой заработной платы работников

соответствующей квалификации $Э_{з.п.час}$ с учетом дополнительных выплат, премиального фонда, отчислений органам социального страхования и времени восстановления конкретных элементов сетей связи за год ($t_{в.год}$): $Э'_{з.п\,t} = Э_{з.п.час} t_{в.год}$.

2. Заработная плата работников за период выполнения профилактических работ и текущего ремонта (при профилактическом методе обслуживания элементов сетей связи) или за период выполнения контрольных наблюдений за работой элементов сетей и анализа их результатов (при восстановительном методе обслуживания) в течение периода эксплуатации элемента сети связи ($T_э$) с учетом дополнительных выплат, премиального фонда и отчислений органам социального страхования: $\sum_{t=1}^{T_э} Э''_{з.п\,t}$, где $Э''_{з.п\,t}$ — заработная плата, начисляемая работникам за период выполнения профилактических работ и текущего ремонта или за период выполнения контроля и анализа контрольных наблюдений за элементами сетей связи в t-м году их эксплуатации. При профилактическом методе обслуживания в каждом варианте обеспечения надежности она зависит от количества основных и резервных элементов сетей связи, периодичности их профилактики и текущего ремонта, затрат времени на выполнение этих работ, квалификации работников. Определяется она также на основе среднечасовой заработной платы работников соответствующей квалификации $Э_{з.п.час}$ и годовых затрат рабочего времени на профилактику и текущий ремонт элементов сетей связи ($t_{проф.год}$):

$$Э''_{з.п\,t} = Э_{з.п.час}\, t_{проф.год};$$

при восстановительном методе обслуживания соответственно:

$$Э''_{з.п\,t} = Э_{з.п.\,час}\, t_{контр.год},$$

где $t_{контр.год}$ — затраты времени на контрольные наблюдения и их анализ в год.

3. Расходы на материалы и запасные части, используемые для текущего ремонта и эксплуатационного обслуживания элементов сетей связи за период их эксплуатации: $\sum_{t=1}^{T_э} Э_{мt}$, где $Э_{мt}$ — расходы на материалы и запасные части, используемые для текущего ремонта и эксплуатационного обслуживания элементов сетей за t-й год их эксплуатации. В каждом варианте обеспечения надежности эти расходы зависят от количества оборудования (основного и резервного), норм расхода деталей конкретного наименования на единицу оборудования и стоимости деталей. При этом стоимость деталей, используемых для капитального ремонта, не учитывается, так как затраты на них входят в расходы на капитальный ремонт. Количество деталей для текущего ремонта и эксплуатационного обслуживания элементов сетей связи может быть рассчитано по методике, предложенной в [29], по формуле

$$H_т = \frac{N_0}{T_д} - \frac{N_0}{T_{к.р}},$$

где N_0 — количество однотипных деталей, входящих в состав рассматриваемого оборудования (устанавливается по принципиальным схемам); $T_д$ — срок службы детали ($T_д < T_{к.р}$); $T_{к.р}$ — период времени между капитальными ремонтами элементов сетей связи.

В каждом варианте обеспечения надежности элементов сетей связи расходы на материалы и запасные части, используемые в t-м году эксплуатации, определяются из выражения

$$Э_{м\,t} = (N + N_{рез}) H_{т\,j} C_{д\,j},$$

где $N + N_{рез}$ — количество основных и резервных комплектов оборудования в рассматриваемом варианте обеспечения надежности; $H_{тj}$ — норма расхода деталей j-го наименования (типа) на единицу оборудования; $C_{дj}$ — стоимость детали j-го типа.

4. Расходы на электроэнергию за период эксплуатации элементов сетей: $\sum_{t=1}^{T_э} Э_{эt}$, где $Э_{эt}$ — расходы на производственную электроэнергию элементов сетей связи за t-й год их эксплуатации, определяемые для каждого варианта обеспечения надежности элементов исходя из количества потребляемой электроэнергии в год ($W_{год}$) и тарифа за 1 кВ·ч (g) : $Э_{эt} = gW_{год}$.

При нагруженном резервировании величина расходов на электроэнергию определяется в зависимости от варианта обеспечения надежности элементов сетей. Такие расходы должны учитываться как составляющий элемент суммарных затрат. При ненагруженном резервировании элементов сетей связи величина расходов на производственную электроэнергию не изменяется по вариантам, и эти расходы можно не учитывать.

Амортизационные отчисления на реновацию при повышении надежности элементов сетей способом резервирования зависят от надежности. Однако в суммарных затратах амортизационные отчисления не учитывают во избежание повторного счета, так как они предназначены для приобретения новых элементов с целью замены отработавших по истечении срока службы. Остальные статьи эксплуатационных расходов на элементы сетей связи либо не зависят от надежности, либо зависят незначительно и ими можно пренебречь.

Суммарные потери предприятий связи и потребителей услуг связи. Суммарные потери из-за отказов элементов сетей связи за период эксплуатации $\sum_{t=1}^{T_э} П_t$ включают в себя потери предприятий связи и потери потребителей услуг связи. К первым относятся потери тарифных доходов из-за отказов элементов сети связи за период их эксплуатации $\sum_{t=1}^{T_э} П_{дох\,t}$. Потери тарифных доходов возникают в связи с тем, что надобность в передаче информации

в последующие часы после устранения перерывов в работе элементов сетей связи иногда отпадает из-за утраты информацией ценности. Все виды информации, в передаче которой участвуют элементы телефонной сети связи, можно выразить через количество разговоров. При этом условии потери тарифных доходов в каждом варианте обеспечения надежности элементов сетей связи за t-й год их эксплуатации определяются по формуле

$$П_{\text{дох}\,t} = C_{\text{час}} D_{\text{т}} t_{\text{п.год}} q_{\text{ц}} q_{\text{обх}}, \qquad (4.2)$$

где $C_{\text{час}}$ — среднечасовое количество разговоров, не состоявшихся за 1 ч простоя элемента сети связи; $D_{\text{т}}$ — средняя доходная такса; $t_{\text{п.год}}$ — средняя продолжительность простоев элемента сети связи в год, в часах; $q_{\text{ц}}$ — удельный вес информации, надобность в передаче которой отпадает из-за утраты ее ценности; $q_{\text{обх}}$ — коэффициент, учитывающий снижение потерь тарифных доходов из-за организации обходных связей [используется в (4.2) для элементов сетей связи, при отказе которых возможна организация обходных связей].

Потери потребителей услуг связи из-за отказов элементов сетей связи за период эксплуатации $\sum_{t=1}^{T_{\text{э}}} П_{\text{потр}\,t}$ определить прямым подсчетом затруднительно. При нахождении оптимальной надежности элементов сетей связи потери потребителей услуг связи в каждом из вариантов обеспечения надежности этих элементов можно рассчитать приближенно одним из двух методов:

потери потребителей услуг связи могут быть приняты равными сумме санкций за нарушение действия связей. Данный метод расчета применим при отказе любых элементов сетей связи;

потери потребителей услуг связи могут быть определены на основе нормативов народнохозяйственной эффективности применения и развития междугородной телефонной связи [27], [28]. Этим методом можно определить потери потребителей услуг связи при отказе элементов сетей междугородной телефонной связи.

Санкции по своей экономической природе представляют собой материальную компенсацию предприятиями связи за определенный вид прямого или косвенного нарушения качества предоставляемых услуг связи. На сумму санкций уменьшается прибыль предприятий связи, однако органы связи компенсацию потребителям услуг связи за нарушение качества связи не производят и для органов связи в целом санкции убытками не являются. Поэтому суммой санкций условно можно оценивать ущерб у потребителей услуг связи.

Сумма санкций за нарушение действия связей по причине отказов элементов сетей связи за t-й год их эксплуатации определяется исходя из продолжительности простоев элемента сети связи в год в часах и величины санкций за час простоя элемента сети связи по установленной номенклатуре показателей нарушения качества связи.

При определении оптимальной надежности элементов сетей междугородной телефонной связи нормативы народнохозяйственной эффективности можно рассматривать как показатели потерь эффекта применения междугородной телефонной связи из-за ненадежности ее элементов, что эквивалентно потерям потребителей услуг связи. При этом необходимо учитывать снижение потерь потребителей услуг связи, поскольку ущерб потребителям наносится из-за невозможности передать в период отказа элементов сетей связи только той части информации, надобность в передаче которой отпадает вследствие утраты ее ценности. Остальная информация может быть передана в последующие часы после устранения отказа. Кроме этого, необходимо учитывать снижение потерь потребителей услуг связи из-за организации обходных связей (там, где это возможно).

Потери потребителей услуг связи из-за отказов элементов сетей связи, определяемые на основе нормативов народнохозяйственной эффективности применения и развития междугородной телефонной связи за t-й год эксплуатации элементов сетей связи по каждому варианту обеспечения надежности этих элементов, могут быть рассчитаны по формуле

$$П_{\text{потр } t} = C_{\text{час}}\, t_{\text{п.год}}\, d_{\text{нх}}\, H_{\text{нх}}\, q_{\text{ц}}\, q_{\text{обх}},$$

где $C_{\text{час}}$ — среднечасовое количество разговоров, не состоявшихся за один час простоя элемента сети междугородной телефонной связи; $d_{\text{нх}}$ — удельный вес разговоров народнохозяйственного сектора в общем количестве разговоров; $H_{\text{нх}}$ — норматив народнохозяйственной эффективности междугородной телефонной связи на один междугородный телефонный разговор.

Характер изменения рассмотренных выше затрат и потерь в зависимости от степени надежности элементов сетей связи будет различным. При повышении надежности элементов сетей связи методом разервирования все виды затрат будут увеличиваться, а потери всех видов — снижаться. При таком характере зависимости затрат и потерь от надежности элементов сетей связи следует ожидать их минимума, который и будет соответствовать оптимальной надежности элементов сетей связи. Условие, при котором достигается оптимальная надежность элементов сетей связи (при резервировании), может быть представлено в более подробном виде следующей формулой:

$$ЗП_{T_э} = K = \sum_{i=1}^{n} K_{\text{к.р } i} + \sum_{t=1}^{T_э} Э'_{\text{з. п.}t} + \sum_{t=1}^{T_э} Э''_{\text{з. п. } t} + \sum_{t=1}^{T_э} Э_{\text{м}t} +$$

$$+ \sum_{t=1}^{T_э} Э_{\text{э}t} + \sum_{t=1}^{T_э} П_{\text{дох}}\, t + \sum_{t=1}^{T_э} П_{\text{потр } t} = \min.$$

При приведении затрат и потерь к одному году эксплуатации условие, при котором достигается оптимальная надежность эле-

ментов сетей связи (при резервировании), может быть записано в виде следующего выражения:

$$З\Pi_{год} = K\alpha + \sum_{i=1}^{n} K_{к.р\,i}\alpha + Э'_{з.п.год} + Э''_{з.п.год} + Э_{м.год} + Э_{э.год} +$$

$$+ \Pi_{дох.год} + \Pi_{потр.год} = \min,$$

где α — коэффициент приведения единовременных затрат на элементы сетей связи к одному году его эксплуатации. Поскольку срок эксплуатации элементов сетей связи значительно больше нормативного срока окупаемости затрат, приведение единовременных затрат к одному году эксплуатации целесообразно производить не по нормативному коэффициенту экономической эффективности, а по величине, обратной сроку службы конкретных элементов сетей связи. Если затраты на капитальный ремонт определяются в год по нормам амортизационных отчислений, то приводить их к году эксплуатации при помощи коэффициента α не требуется.

4.3. Определение оптимальной надежности элементов сетей связи по максимуму отдачи на вложенные средства

В основу второго метода определения оптимальной надежности элементов сетей связи по экономическому критерию также положено требование обеспечения наибольшего экономического эффекта для народного хозяйства. Оптимальная надежность элементов сетей связи определяется путем сопоставления различных вариантов обеспечения надежности элемента сети связи по величине эффекта, получаемого на рубль затрат. Надежность элемента сети связи будет оптимальной, если обеспечивается максимум эффекта, получаемого на рубль затрат, приведенных к году его эксплуатации. Условие, при котором достигается оптимальная надежность элементов сетей связи, может быть представлено в общем виде следующей формулой:

$$K_{отд} = \frac{Q}{З_{\Sigma}} = \max,$$

где $K_{отд}$ — коэффициент, характеризующий отдачу вложенных средств на обеспечение надежности элемента сети связи, приведенных к году его эксплуатации; Q — величина отдачи за год; $З_{\Sigma}$ — суммарные затраты (капитальные и эксплуатационные) на элемент сети связи, зависящие от его надежности, приведенные к году эксплуатации.

При условии, что всю информацию, в передаче которой участвуют элементы телефонной сети связи, можно представить в виде количества разговоров, величина отдачи за год (Q) может быть выражена в каждом варианте обеспечения надежности элементов сетей связи либо количеством разговоров, передачу которых обеспечивает элемент сети связи, либо величиной объема продукции в

денежном измерении, либо величиной тарифных доходов. Суммарные затраты, приводимые к году эксплуатации, $З_{\Sigma}$ включают в себя только те элементы затрат, которые зависят от надежности элемента сети связи. Виды затрат, входящие в состав $З_{\Sigma}$, и методика их расчета такие же, как и при определении оптимальной надежности элементов сетей связи первым методом.

Таким образом, условие, при котором достигается оптимальная надежность элемента сети связи при определении ее вторым методом, может быть представлено более подробно следующим выражением:

$$K_{\text{отд}} = Q : \left(K\alpha + \sum_{i=1}^{n} K_{\text{к.р}\,i}\,\alpha + Э'_{\text{з.п.год}} + Э''_{\text{з.п.год}} + Э_{\text{м.год}} + Э_{\text{э. год}} \right) = \max.$$

4.4. Определение оптимальной надежности оборудования каналов и групповых трактов

В качестве примера использования описанной выше методики рассмотрим порядок определения оптимальной надежности и оптимальной кратности резервирования оборудования каналов и групповых трактов. Оптимальную надежность будем определять первым методом — по минимуму суммарных затрат и потерь.

В изложенной выше методике используются данные о затратах в процессе эксплуатации и об исходном уровне надежности. За основу расчетов принимаются эксплуатационные данные при средних условиях эксплуатации магистралей, оборудованных системами передачи К-1920.

С целью выявления оптимальной надежности, оптимальной кратности резервирования для каждого типа каналообразующего оборудования сопоставляются различные варианты обеспечения надежности: без резервирования и с различной кратностью резервирования. Повышение надежности в вариантах с резервированием предполагается методом скользящего ненагруженного резервирования с восстановлением при ручном переключении блоков и плат.

В основу расчетов положено каналообразующее оборудование двух систем передачи К-1920 (3840 блоков индивидуального оборудования, 320 комплектов оборудования первичных групп, 64 комплекта оборудования вторичных групп).

К индивидуальному оборудованию каналов связи относятся врубные блоки индивидуального преобразования БИП. Способ скользящего ненагруженного резервирования БИП описан в § 1.7. Индивидуальное оборудование каналов может содержать различное количество резервных комплектов из 12 невзаимозаменяемых блоков БИП. При определении оптимальной надежности индивидуального оборудования каналов достаточно рассмотреть вариант без резервирования и варианты с кратностью резервирования 1/320, 2/320, 3/320.

Оборудованием первичной группы являются врубные панели первичного преобразования. Для каждой двенадцатиканальной первичной группы предусматриваются панель передачи первичной группы ППГ и панель приема первичной группы ППрГ. Кроме того, для третьей первичной группы предусматривается панель заграждающего фильтра ЗФ-104,14. Способ скользящего ненагруженного резервирования панелей первичного группового оборудования описан в § 1.8. Первичное групповое оборудование каналов может содержать один или несколько резервных комплектов оборудования первичного преобразования. При определении оптимальной надежности первичного группового оборудования каналов достаточно рассмотреть вариант без резервирования и варианты с кратностью резервирования 1/64, 2/64, 3/64.

Оборудованием вторичной группы являются врубные панели усилителя передачи вторичной группы и панели вторичного преобразования. Для каждой

60-канальной вторичной группы предусматриваются: панель усилителя передачи вторичной группы ПУС 312—552, панель передачи вторичной группы ППВГ и панель приема вторичной группы ППрВГ. Способ скользящего ненагруженного резервирования панелей вторичного группового оборудования рассмотрен в § 1.8. Вторичное групповое оборудование каналов связи может содержать резервные комплекты с различным сочетанием панелей. При определении оптимальной надежности вторичного группового оборудования каналов связи достаточно рассмотреть вариант без резервирования и варианты с кратностью резервирования 1/8 (1/64), 1/8 (2/64); 2/8 (2/64), 3/8 (3/64), где цифры без скобок означают кратность резервирования панелей передачи и приема вторичных групп, а цифры в скобках — кратность резервирования усилителей передачи ПУС 312—552.

Все варианты сопоставляются по числу каналов связи и качеству, т. е. степени надежности. Затраты и потери приводятся к одному году эксплуатации. За коэффициент приведения принята величина, обратная сроку службы оборудования. Приведение единовременных затрат при помощи коэффициента экономической эффективности в данном случае неприменимо, так как срок эксплуатации каналообразующего оборудования связи значительно превышает нормативный срок окупаемости капитальных затрат.

Затраты и потери, рассчитанные для каждого рассматриваемого варианта обеспечения надежности каналообразующего оборудования связи и используемые для определения его оптимальной надежности, приведены в табл. 4.1—4.3 ниже. Расчеты отдельных видов затрат и потерь в качестве примера производились для второго варианта обеспечения надежности первичного группового оборудования каналов при резервировании панелей первичного преобразования способом ненагруженного резервирования с восстановлением при кратности резервирования 1/64. Капитальные затраты на каналообразующее оборудование связи определялись путем составления смет. Во внимание принимались затраты на то оборудование, которое непосредственно оказывает влияние на величину простоя каналов. Для первичного группового оборудования каналов таким оборудованием являются панели первичного преобразования. Согласно смете капитальные затраты на основной комплект панелей первичного преобразования, состоящий из одиннадцати панелей ПГПГ, ПГПрПГ и ЗФ, не взаимозаменяемых в пределах 60-канальной группы, составляют 920,1 руб., на резервный комплект — 888,1 руб. Рассматриваемое оборудование (две системы К-1920) при варианте с кратностью резервирования 1/64 содержит $N=64$ основных комплектов панелей первичных групп и $N_{\text{рез}}=1$ резервных комплектов панелей. Капитальные затраты на все комплекты панелей первичных групп составляют

$$\Sigma K = K_0 N + K_{\text{р}} N_{\text{рез}} = 920{,}1 \cdot 64 + 888{,}1 \cdot 1 = 59774{,}5 \text{ руб.};$$

капитальные затраты на одну первичную группу равны

$$K = \Sigma K / N = 59774{,}5/320 = 186{,}8 \text{ руб.}$$

Капитальные затраты на одну первичную группу, приведенные к году эксплуатации,

$$K_{\text{год}} = 186{,}8\,\alpha = 186{,}8 \cdot 0{,}05 = 9{,}34 \text{ руб.},$$

где α — коэффициент приведения единовременных затрат к году эксплуатации, равный 0,05 при сроке службы каналообразующего оборудования 20 лет.

Расчет капитальных затрат, приведенных к году эксплуатации, по всем вариантам обеспечения надежности для индивидуального, первичного группового и вторичного группового оборудования аналогичен.

Затраты на капитальный ремонт в год определены исходя из капитальных затрат на каналообразующее оборудование и установленных норм амортизационных отчислений на капитальный ремонт. Например, для первичного группового оборудования каналов по второму варианту обеспечения его надежности амортизационные отчисления на капитальный ремонт оборудования одной первичной группы в год составляют

$$K_{\text{к.р.год}} = KH_{\text{а}} = 186{,}8 \cdot 0{,}017 = 3{,}18 \text{ руб.}$$

По другим вариантам расчет аналогичен.

Таблица 4.1

Варианты	Кратность резервирования	Время простоя канала в год, ч	$K_{п.и.о}$	$K_{год}$, руб.	$K_{кр.год}$, руб.	$Э_{год}$, руб.	$П_{год}$, руб., с учетом		$ЗП_{год}$, руб., с учетом	
							$П_{потр.\ год}$ 1-й метод	$П_{потр.\ год}$ 2-й метод	$П_{потр.\ год}$ 1-й метод	$П_{потр.\ год}$ 2-й метод
I — без резервирования	—	0,07496	$8{,}558 \cdot 10^{-6}$	3,542	1,20	2,568	69,39	36,73	8,00	7,68
II — с резервированием	1/320	0,00175	$1{,}998 \cdot 10^{-7}$	3,553	1,21	2,575	1,62	0,86	7,35	7,35
III — с резервированием	2/320	0,001648	$1{,}8811 \cdot 10^{-7}$	3,563	1,211	2,583	1,53	0,81	7,37	7,37
IV — с резервированием	3/320	0,001647	$1{,}8810 \cdot 10^{-7}$	3,574	1,215	2,589	1,52	0,81	7,39	7,39

Таблица 4.2

Варианты	Кратность резервирования	Время простоя фиксированной первичной группы в год, ч	$K_{п.п.г}$	$K_{год}$, руб.	$K_{кр.год}$, руб.	$Э_{год}$, руб.	$П_{год}$, руб., с учетом		$ЗП_{год}$, руб., с учетом	
							$П_{потр.\ год}$ 1-й метод	$П_{потр.\ год}$, 2-й метод	$П_{потр.\ год}$, 1-й метод	$П_{потр.\ год}$, 2-й метод
I — без резервирования	—	0,755	$8{,}6211 \cdot 10^{-5}$	9,2	3,13	7,43	83,88	44,42	103,64	64,18
II — с резервированием	1/64	0,0159	$1{,}8119 \cdot 10^{-6}$	9,34	3,18	7,53	1,77	0,93	21,82	20,98
III — с резервированием	2/64	0,0148	$1{,}6930 \cdot 10^{-6}$	9,48	3,22	7,62	1,64	0,87	21,96	21,19
IV — с резервированием	3/64	0,0148	$1{,}6929 \cdot 10^{-6}$	9,62	3,27	7,71	1,64	0,87	22,24	21,47

Таблица 4.3

Варианты	Кратность резервирования	Время простоя фиксированной вторичной группы в год, ч	$K_{п.в.г}$	$K_{год}$, руб.	$K_{кр.год}$, руб.	$Э_{год}$, руб.	$П_{год}$, руб., с учетом		$ЗП_{год}$, руб., с учетом	
							$П_{потр.\ год}$ 1-й метод	$П_{потр.\ год}$ 2-й метод	$П_{потр.\ год}$ 1-й метод	$П_{потр.\ год}$ 2-й метод
I — без резервирования	—	2,161	$2{,}467 \cdot 10^{-4}$	12,91	4,39	11,30	1200,40	635,44	1229,0	664,0
II — с резервированием	1/8(1/64)	0,0564	$6{,}434 \cdot 10^{-6}$	14,21	4,83	12,33	31,33	16,58	62,7	48,0
III — с резервированием	1/8(2/64)	0,0544	$6{,}2102 \cdot 10^{-6}$	14,24	4,84	12,34	30,22	15,99	61,6	47,4
IV — с резервированием	2/8(2/64)	0,0540	$6{,}1647 \cdot 10^{-6}$	15,51	5,27	13,35	30,00	15,88	64,1	50,0
V — с резервированием	3/8(3/64)	0,0540	$6{,}1644 \cdot 10^{-6}$	16,81	5,71	14,38	30,00	15,88	66,9	52,8

Расходы на заработную плату работникам, устраняющим отказы в каналообразующем оборудовании связи, за период обнаружения и устранения отказов в год определены исходя из заработной платы в час работников соответствующей квалификации с учетом дополнительных выплат, премиального фонда, районного коэффициента к заработной плате, отчислений органам социального страхования и суммарного времени восстановления соответствующего оборудования за год в часах. Для второго варианта обеспечения надежности первичного группового оборудования каналов на каждую первичную группу они составят

$$Э'_{з.п.год} = Э_{з.п.час}\, t_{в.год} = 0{,}674 \cdot 0{,}754 = 0{,}51 \text{ руб.}$$

Для всех вариантов обеспечения надежности однотипного каналообразующего оборудования $Э'_{з.п.год}$ одинаковы, так как время восстановления отказавших блоков (панелей) не зависит от наличия резервирования, а определяется исходным уровнем надежности. Время восстановления отказавших блоков (панелей) рассматриваемого каналообразующего оборудования определено по данным хронометражных наблюдений.

Расходы на заработную плату работников, начисляемую за период проведения профилактики и текущего ремонта каналообразующего оборудования связи, определяются исходя из часовой заработной платы работников соответствующей квалификации и затрат рабочего времени на профилактику и текущий ремонт соответствующего оборудования в год. Затраты времени на профилактику и текущий ремонт каналообразующего оборудования определяются на основе данных технологических карт и хронометражных наблюдений. При этом учитывается, что находящиеся в ненагруженном резерве блоки (панели) не требуют проведения ежедневной, еженедельной и месячной профилактики. Затраты времени на профилактику и текущий ремонт оборудования первичного преобразования для второго варианта обеспечения надежности при кратности резервирования 1/64 составляют в год: 6,72 часа для основного оборудования первичной группы и 5,55 часа для резервного оборудования первичной группы. На профилактику и текущий ремонт всего оборудования первичного преобразования рассматриваемой совокупности затраты времени в год составят

$$\Sigma t = 6{,}72\, N + 5{,}55\, N_{рез} = 6{,}72 \cdot 320 + 5{,}55 \cdot 5 = 2178{,}15 \text{ ч.}$$

Заработная плата работников, начисляемая за период проведения профилактики и текущего ремонта оборудования первичного преобразования рассматриваемой совокупности, приходящаяся на одну основную первичную группу, равна

$$Э''_{з.п.год} = Э_{з.п.час}\, \Sigma t : N = 0{,}765 \cdot 2178{,}15 : 320 = 5{,}21 \text{ руб.}$$

Расходы на материалы и запасные части для одного комплекта блоков (панелей) каналообразующего оборудования рассчитываются по методике, описанной выше. Расходы на материалы и запасные части для одного комплекта панелей первичного группового оборудования каналов составляют в год 8,91 руб. На одну первичную группу для второго варианта обеспечения надежности первичного группового оборудования расходы на материалы и запасные части в год равны

$$Э_{м.год} = 8{,}91\,(64 + 1) : 320 = 1{,}81 \text{ руб.}$$

Суммарные эксплуатационные расходы на одну первичную группу в год составляют

$$Э_{год} = 0{,}51 + 5{,}21 + 1{,}81 = 7{,}53 \text{ руб.}$$

Для расчета потерь тарифных доходов принято: среднечасовое количество разговоров по одному каналу $C_{час} = 2{,}4$; средняя доходная такса $D_т = 1{,}75$; коэффициент, учитывающий снижение потерь тарифных доходов из-за организации обходных связей, $q_{обх} = 0{,}75$. Коэффициент $q_{обх}$ может быть определен в виде доли невозмещаемых каналов из-за отсутствия резервных обходных связей ($n_{общ} - n_{рез}$) от общего количества каналов, вышедших из строя при отказах соответствующего каналообразующего оборудования $n_{общ}$, по формуле

$$q_{обх} = \frac{n_{общ} - n_{рез}}{n_{общ}}.$$

Каналы, используемые для организации обходных связей за счет закрытия других связей, в число возмещаемых (резервных) каналов не включаются, так как потери тарифных доходов в этом случае не уменьшаются; они имеют место на других магистралях. Коэффициент, учитывающий долю информации, надобность в передаче которой отпадает в результате утраты ее ценности, принят $q_{ц} = 0{,}082$.

Для первичного группового оборудования каналов потери тарифных доходов в год при отказе первичной группы в расчете на одну первичную группу составляют (рассматривается второй вариант обеспечения надежности с кратностью резервирования 1/64)

$$П_{дох.год} = C_{час} D_{т} t_{п.год} q_{ц} q_{обх} \cdot 12 = 2{,}4 \cdot 1{,}75 \cdot 0{,}0159 \cdot 0{,}082 \cdot 0{,}75 \cdot 12 = 0{,}049 \text{ руб}.$$

Потери потребителей услуг связи определяются двумя методами:

на основе суммы санкций за нарушение действия связей;

на основе нормативов народнохозяйственной эффективности применения и развития междугородной телефонной связи.

По второму варианту обеспечения надежности первичного группового оборудования каналов потери потребителей услуг связи в год, определенные по сумме санкций за нарушение действия связей, на одну первичную группу составляют

$$П_{потр.год} = H_{санк} t_{п.год} \cdot 12 = 9 \cdot 0{,}0159 \cdot 12 = 1{,}717 \text{ руб},$$

где $H_{санк}$ — сумма санкций за простой канала в течение часа. То же, на основе нормативов народнохозяйственной эффективности междугородной телефонной связи

$$П_{потр.год} = C_{час} t_{п.год} d_{нх} H_{нх} q_{ц} q_{обх} \cdot 12 =$$
$$= 2{,}4 \cdot 0{,}0159 \cdot 0{,}669 \cdot 47 \cdot 0{,}082 \cdot 0{,}75 \cdot 12 = 0{,}885 \text{ руб}.$$

Суммарные потери предприятий связи и потребителей услуг связи на одну первичную группу в год составят:

при учете потерь потребителей услуг связи суммой санкций

$$П_{год} = 0{,}049 + 1{,}717 = 1{,}77 \text{ руб.};$$

при учете потерь потребителей услуг связи на основе нормативов народнохозяйственной эффективности междугородной телефонной связи

$$П_{год} = 0{,}049 + 0{,}885 = 0{,}93 \text{ руб}.$$

Суммарные затраты и потери на одну первичную группу, приведенные к году эксплуатации, равны:

при учете потерь потребителей услуг связи первым методом

$$ЗП_{год} = 9{,}34 + 3{,}18 + 7{,}53 + 1{,}77 = 21{,}82 \text{ руб.};$$

при учете потерь потребителей услуг связи вторым методом

$$ЗП_{год} = 9{,}34 + 3{,}18 + 7{,}53 + 0{,}93 = 20{,}98 \text{ руб}.$$

Методика расчета затрат и потерь для остальных вариантов обеспечения надежности всех видов каналообразующего оборудования связи аналогична.

На основании выполненных расчетов отдельных видов затрат и потерь для каждого вида каналообразующего оборудования связи определены суммарные затраты и потери (см. табл. 4.1—4.3) для двух методов учета потерь потребителей услуг связи. По табл. 4.1—4.3 можно определить:

оптимальную надежность каналообразующего оборудования связи системы передачи К-1920, выражаемую коэффициентом простоя $K_{п}$;

оптимальную кратность резервирования, при которой достигается оптимальная надежность;

оптимальное количество резервных комплектов блоков (панелей) индивидуального, первичного и вторичного группового оборудования каналов на рассмотренную совокупность оборудования;

экономию затрат и потерь, получаемую народным хозяйством в год при достижении оптимальной надежности каналообразующего оборудования связи по сравнению с вариантом без резервирования.

Из данных табл. 4.1—4.3 видно, что для всех видов каналообразующего оборудования связи оптимальная надежность достигается в вариантах с резервированием. При этом наблюдается совпадение вариантов, соответствующих оптимальной надежности каналообразующего оборудования связи при учете потерь потребителей услуг связи разными методами. Оптимальная надежность индивидуального оборудования каналов по экономическому критерию достигается для рассматриваемого оборудования при кратности резервирования 1/320. Ей соответствует время простоя фиксированного канала в год $t_{\text{п.год}}=0{,}00175$ ч, коэффициент простоя индивидуального оборудования каналов $K_{\text{п}}=1{,}998\cdot10^{-7}$. Экономия затрат и потерь, приведенных к году эксплуатации, при достижении оптимального уровня надежности индивидуального оборудования каналов по сравнению с вариантом без резервирования в расчете на один канал составляет: 0,65 руб. при учете потерь потребителей услуг связи первым методом и 0,33 руб. при учете потерь потребителей услуг связи вторым методом.

Оптимальная надежность первичного группового оборудования каналов связи обеспечивается при кратности резервирования 1/64, время простоя фиксированной первичной группы в год для оптимального варианта составляет $t_{\text{п.год}}=0{,}0159$ ч, коэффициент простоя первичного группового оборудования каналов связи равен $K_{\text{п}}=1{,}8119\cdot10^{-6}$. Экономия затрат и потерь, приведенных к году эксплуатации, при достижении оптимального уровня надежности первичного группового оборудования каналов связи по сравнению с вариантом без резервирования в расчете на одну первичную группу равна: 81,82 руб. при учете потерь потребителей услуг связи первым методом и 43,2 руб. при учете потерь потребителей услуг связи вторым методом.

Оптимальная надежность вторичного группового оборудования каналов связи достигается при кратности резервирования 1/8 (2/64), время простоя фиксированной вторичной группы в год для оптимального варианта составляет $t_{\text{п.год}}=0{,}0544$ ч, коэффициент простоя вторичного группового оборудования каналов связи равен $K_{\text{п}}=62102\cdot10^{-6}$. Экономия затрат и потерь, приведенных к году эксплуатации, при достижении оптимального уровня надежности вторичного группового оборудования каналов связи по сравнению с вариантом без резервирования в расчете на одну вторичную группу составляет: 1167,4 руб. при учете потерь потребителей услуг связи первым методом и 616,6 руб. при учете потерь потребителей услуг связи вторым методом.

4.5. Определение оптимальной надежности проектируемых элементов сетей связи на основе данных о затратах и потерях для аналогичного оборудования

Метод определения оптимальной надежности элементов сетей связи по минимуму затрат и потерь, рассмотренный на примере каналообразующего оборудования связи системы передачи К-1920, может быть использован для определения уровней оптимальной надежности любых элементов сетей связи, находящихся в эксплуатации. Для определения оптимальных уровней надежности элементов сетей связи, находящихся в эксплуатации, и оптимальной кратности их резервирования необходимо располагать данными о капитальных затратах на элементы сетей связи, затратах на их эксплуатацию, потерях, зависящих от их надежности, а также данными об исходном уровне надежности. Получение требуемых данных не представляет особых трудностей.

При проектировании элементов сетей связи получить все данные для определения оптимального уровня надежности затруднительно, так как нет опыта их эксплуатации. Однако следует учесть, что между отдельными видами затрат и потерь элементов сетей связи, находящихся в эксплуатации, и аналогичными видами затрат и потерь проектируемых элементов сетей связи, предназначенных для выполнения тех же функций, наблюдается либо равенство, либо определенная зависимость. Например, потери предприятий связи и потребителей услуг связи из-за ненадежности элементов сетей связи (проектируемых и находящихся в эксплуатации), выполняющих одинаковые функции, а также заработная плата работников на устранение отказов при одинаковых $K_{\text{п}}$ одинаковы. Мало зависят от уровня надежности одинаковых по функциям элементов сетей связи затраты на заработную плату, начисляемую за период выполнения профилактических работ и текущего ремонта (при профилактическом методе обслуживания) или за период выполнения контрольных наблюдений за работой элементов сетей связи и анализа этих наблюдений (при восстановительном методе обслуживания). Эти расходы можно принять для проектируемых элементов сетей одинаковыми с расходами на аналогичное действующее оборудование.

Существенно зависят от уровня надежности проектируемых элементов сетей по сравнению с аналогичным действующим оборудованием капитальные затраты, расходы на капитальный ремонт и затраты на материалы и запасные части. Последние два вида затрат для проектируемых элементов можно принять ориентировочно изменяющимися пропорционально капитальным затратам. В большинстве случаев новые типы оборудования требуют бо́льших капитальных затрат, чем действующее оборудование с такими же функциями, и обладают более высокой надежностью.

Для определения конкретных уровней оптимальной надежности проектируемых элементов сетей необходимо исследовать изменение затрат и потерь, зависящих от надежности этих элементов, от возможного увеличения капитальных затрат и повышения их надежности по сравнению с капитальными затратами и уровнем надежности действующего оборудования. При исследованиях затраты и потери, зависящие от надежности элементов сетей, целесообразно разделить на три группы:

не зависящие от типа элементов сетей связи, но зависящие от уровня их надежности (потери предприятий связи и потребителей услуг связи, заработная плата, начисляемая работникам за период устранения отказов);

условно принимаемые одинаковыми для однотипных элементов сетей связи (заработная плата работников, начисляемая за период выполнения профилактических работ и текущего ремонта оборудования);

зависящие от типа элементов сетей связи (капитальные затраты, расходы на капитальный ремонт, расходы на материалы и запасные части).

Таблица 4.4

Варианты	Затраты и потери, зависящие от $K_п$, коп.			Затраты, принимаемые условно постоянными, коп.	Затраты, зависящие от типа аппаратуры, руб.			$З_{год}$, руб., на канал при увеличении K на 10 %			$З_{год}$, руб., на канал при увеличении K на 25%		
	для К-1920	уменьшение $K_п$			для К-1920	увеличение K		для К-1920	уменьшение $K_п$		для К-1920	уменьшение $K_п$	
		в 1,5 раза	в 2 раза			на 10 %	на 25 %		в 1,5 раза	в 2 раза		в 1,5 раза	в 2 раза
I — без резервирования	74,4	49,1	37,2	57,4	6,69	7,36	8,36	8,68	8,43	8,31	9,68	9,43	9,31
II — с резервированием	6,7	4,4	3,3	57,5	6,71	7,38	8,39	8,02	8,00	8,00	9,03	9,01	9,00
III — с резервированием	6,6	4,3	3,3	57,6	6,73	7,40	8,41	8,04	8,02	8,01	9,07	9,03	9,02
IV — с резервированием	6,6	4,3	3,3	57,7	6,75	7,43	8,44	8,07	8,04	8,04	9,08	9,06	9,05

Таблица 4.5

Варианты	Затраты и потери, зависящие от $K_п$, руб.			Затраты, принимаемые условно постоянными, руб.	Затраты, зависящие от типа аппаратуры, руб.			$З_{год}$, руб., на ПГ при увеличении K на 10%			$З_{год}$, руб., на ПГ при увеличении K на 25%		
	для К-1920	уменьшение $K_п$			для К-1920	увеличение K		для К-1920	уменьшение $K_п$		для К-1920	уменьшение $K_п$	
		в 1,5 раза	в 2 раза			на 10%	на 25%		в 1,5 раза	в 2 раза		в 1,5 раза	в 2 раза
I — без резервирования	84,38	55,69	42,19	5,14	14,11	15,52	17,64	105,04	76,35	62,85	107,16	78,47	64,97
II — с резервированием	2,27	1,50	1,14	5,21	14,33	15,76	17,91	23,24	22,47	22,11	25,39	24,62	24,26
III — с резервированием	2,15	1,42	1,08	5,27	14,54	15,99	18,18	23,41	22,68	22,34	25,60	24,87	24,53
IV — с резервированием	2,15	1,42	1,08	5,34	14,76	16,24	18,45	23,73	23, 0	22,66	25,94	25,21	24,87

Таблица 4.6

Варианты	Затраты и потери, зависящие от $K_п$, руб.			Затраты, принимаемые условно постоянными, руб.	Затраты, зависящие от типа аппаратуры, руб.			$З П_{год}$, руб., на ВГ при увеличении K на 10%			$З П_{год}$, руб., на ВГ при увеличении K на 25%		
	для К-1920	уменьшение $K_п$			для К-1920	увеличение K		для К-1920	уменьшение $K_п$		для К-1920	уменьшение $K_п$	
		в 1,5 раза	в 2 раза			на 10%	на 25%		в 1,5 раза	в 2 раза		в 1,5 раза	в 2 раза
I — без резервирования	1201,9	793,3	600,9	7,5	19,7	21,7	24,6	1231,1	822,5	630,1	1234	825,4	632,9
II — с резервированием	32,8	21,7	16,4	8,3	21,7	23,9	27,1	65,0	53,9	48,6	68,2	57,1	51,8
III — с резервированием	31,8	21,0	15,9	8,3	21,7	23,9	27,1	64,0	53,2	48,1	67,7	56,4	51,3
IV — с резервированием	31,5	20,8	15,7	9,1	23,6	26,0	29,5	66,6	55,9	50,8	70,1	59,4	54,3
V — с резервированием	31,5	20,8	15,7	9,4	25,6	28,2	32,0	69,1	58,5	53,3	72,9	62,2	57,1

Затраты и потери первой группы необходимо исследовать в зависимости от изменения уровня надежности, затраты третьей группы — от изменения капитальных затрат.

В качестве примера в табл. 4.4—4.6 приводятся результаты исследования зависимостей затрат и потерь нового каналообразующего оборудования связи от возможного увеличения степени его надежности по сравнению с показателем надежности аналогичного каналообразующего оборудования системы передачи К-1920 в 1,5 и 2 раза и капитальных затрат на 10 и 25%.

Исследования показали, что при увеличении степени надежности нового каналообразующего оборудования связи и капитальных затрат на него в рассматриваемых пределах оптимальная кратность резервирования, соответствующая минимуму суммарных затрат и потерь для рассматриваемой совокупности оборудования, не изменилась. Однако уровень надежности каналообразующего оборудования связи новых систем передачи, подобных по принципу построения системе передачи К-1920, соответствующий минимуму народнохозяйственных затрат и потерь, будет несколько выше уровня надежности аналогичного оборудования системы передачи К-1920. Коэффициенты простоя, соответствующие оптимальному уровню надежности каналообразующего оборудования новых систем передачи, могут быть определены по соответствующим формулам гл. 1, исходя из оптимальной кратности резервирования и исходного уровня надежности нового каналообразующего оборудования связи.

Подобные исследования изменений затрат и потерь от степени увеличения уровня надежности и капитальных затрат на новые элементы сетей связи по сравнению с затратами и потерями аналогичного действующего оборудования можно провести для любых элементов сетей связи и выявить оптимальный уровень их надежности и оптимальную кратность резервирования.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Расчет вероятностей состояний в полнодоступной группе приборов различной производительности

Рассматривается полнодоступная группа из n приборов. Длительность занятия i-го прибора имеет экспоненциальное распределение с параметром ν_i. На эту группу приборов поступает простейший поток вызовов с интенсивностью λ. Обозначим $\rho_i = \lambda/\nu_i$.

Пусть $N = \{1, 2, \ldots, n\}$ — множество всех номеров приборов, а M — некоторое подмножество множества N. Вероятность состояния, когда заняты все приборы с номерами из M, а все остальные свободны, обозначим через $P(M)$. Тогда система уравнений равновесия для установившихся вероятностей состояний будет иметь вид

$$\left(\lambda + \sum_{i \in M} \nu_i\right) P(M) = \sum_{i \in N \setminus M} \nu_i P(M \cup \{i\}) + \frac{\lambda}{n - |M| + 1} \sum_{i \in M} P(M \setminus \{i\}), \quad (\text{П.I.1})$$

где $|M|$ означает число элементов подмножества M, а уравнения составляются для всех подмножеств M множества N. Условие нормировки

$$\sum_{M \subseteq N} P(M) = 1. \qquad (\text{П.I.2})$$

Можно показать, что решением системы уравнений (П.I.1) при условии нормировки (П.I.2) будет

$$P(M) = \frac{(n - |M|)! \prod_{i \in M} \rho_i}{\sum_{R \subseteq N} \left[(n - |R|)! \prod_{j \in R} \rho_i \right]}. \qquad (\text{П.I.3})$$

Очевидно, вероятность потерь будет

$$p = P(N) = \frac{\prod_{i \in N} \rho_i}{\sum_{R \subseteq N} \left[(n - |R|)! \prod_{j \in R} \rho_i \right]}.$$

Аналогичные результаты в несколько ином виде были получены А. А. Шахбазовым [16].

Частным случаем рассмотренной системы является система, состоящая из приборов двух типов, в которой приборов первого типа n_1, а приборов второго типа $n_2 = n - n_1$. Длительности занятия приборов первого и второго типов распределены по экспоненциальному закону с параметрами соответственно ν_1 и ν_2.

Обозначим E_{xy}, где $x = 0, 1, 2, \ldots, n_1$, а $y = 0, 1, 2, \ldots, n_2$, состояние системы, когда заняты x приборов первого типа и y приборов второго типа. Пусть M_{xy} — фиксированное множество приборов, содержащее x приборов первого типа и y приборов второго типа. Тогда

$$P(E_{xy}) = C_{n_1}^x \, C_{n_2}^y \, P(M_{xy}). \qquad (\text{П.I.4})$$

Преобразуем знаменатель формулы (П.I.3) применительно к рассматриваемому случаю. Пусть множество R содержит z приборов первого типа и u приборов второго типа. Количество таких множеств равно $C_{n_1}^z \, C_{n_2}^u$. Для каждого такого множества будем иметь

$$(n - |R|)! \prod_{i \in R} \rho_i = (n - z - u)! \, \rho_1^z \, \rho_2^u.$$

Поэтому знаменатель формулы (П.I.3) принимает вид

$$\sum_{z=0}^{n_1} \sum_{u=0}^{n_2} C_{n_1}^z \, C_{n_2}^u (n - z - u)! \, \rho_1^z \, \rho_2^u.$$

Тогда

$$P(M_{x,y}) = \frac{(n - x - y)! \, \rho_1^x \, \rho_2^y}{\sum_{z=0}^{n_1} \sum_{u=0}^{n_2} C_{n_1}^z \, C_{n_2}^u (n - z - u)! \rho_1^z \, \rho_2^u}. \qquad (\text{П.I.5})$$

Из (П.I.4) и (П.I.5) получаем

$$P(E_{x,y}) = \frac{C_{n_1}^x \, C_{n_2}^y (n - x - y)! \rho_1^x \, \rho_2^y}{\sum_{z=0}^{n_1} \sum_{u=0}^{n_2} C_{n_1}^z \, C_{n_2}^u (n - z - u)! \, \rho_1^z \, \rho_2^u}. \qquad (\text{П.I.6})$$

Очевидно, вероятность потерь

$$p = P(M_{n_1 n_2}) = \frac{\rho_1^{n_1}\rho_2^{n_2}}{\sum\limits_{z=0}^{n_1}\sum\limits_{u=0}^{n_2} C_{n_1}^{z} C_{n_2}^{u}(n-z-u)!\,\rho_1^{z}\rho_2^{u}}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Рекуррентные формулы для вычисления вероятности потерь в полнодоступной группе приборов с учетом ненадежности и периодического контроля работоспособности оборудования

I. Рекуррентные формулы для вычисления $P\{з/B_{l,m}\}$ [см. (2.8)]. Обозначим $Q\{з/B_{l,m}\}=1/P\{з/B_{l,m}\}$. Тогда, исходя из (2.8),

$$Q\{з/B_{l,m}\} = \frac{\int\limits_0^\infty e^{-x}(x+\rho_1)^{n-l-m}(x+\rho_2)^m\,dx}{\rho_1^{n-l-m}\rho_2^m} \qquad (П.II.1)$$

или

$$Q\{з/B_{l,m}\} = \int\limits_0^\infty e^{-x}\left(\frac{x}{\rho_1}+1\right)^{n-l-m}\left(\frac{x}{\rho_2}+1\right)^m dx.$$

Преобразуем последнее выражение при помощи интегрирования по частям:

$$Q\{з/B_{l,m}\} = \frac{n-l-m}{\rho_1}Q\{з/B_{l+1,m}\} + \frac{m}{\rho_2}Q\{з/B_{l,m-1}\} + 1. \qquad (П.II.2)$$

При $n-l-m=0$ или $m=0$ одно из слагаемых в последнем выражении исчезает. Очевидно, что

$$Q\{з/B_{n,0}\} = 1. \qquad (П.II.3)$$

Для рекуррентного вычисления $Q\{з/B_{l,m}\}$ находится последовательно $Q\{з/B_{l,0}\}$, для чего l уменьшается от $l=n$ до $l=0$. Для этого используются формулы (П.II.3) и

$$Q\{з/B_{l,0}\} = \frac{n-l}{\rho_1}Q\{з/B_{l+1,0}\} + 1. \qquad (П.II.4)$$

Далее для $m=1, 2, \ldots, n-l-1$ находится рекуррентно $Q\{з/B_{l,m}\}$ по формуле (П.II.2). Для $m=n-l$ используется выражение

$$Q\{з/B_{l,n-l}\} = \frac{n-l}{\rho_2}Q\{з/B_{l,n-l-1}\} + 1. \qquad (П.II.5)$$

Данный метод является модификацией известного метода рекуррентного вычисления потерь по формуле Эрланга [17].

II. Формула для вычисления $P\{л/B_{l,m}\}$ [см. (2.11)]

$$P\{л/B_{l,m}\} = \frac{m}{\rho_2}\frac{Q\{з/B_{l+1,m-1}\}}{Q\{з/B_{l,m}\}}.$$

Формула получается исходя из (2.11) и (П.II.1).

III. Рекуррентные формулы для вычисления вероятностей $P\{A_{i,j}\}$ и $P\{D_{a,b,c}/A_{i,j}\}$ [см. (2.18) и (2.19)]:

$$P\{A_{0,0}\} = [P_1(\Gamma)]^{n_1};$$

$$P\{A_{i,0}\} = \frac{n_1 - i + 1}{i} \frac{P_2(\Gamma)}{P_1(\Gamma)} P\{A_{i-1,0}\};$$

$$P\{A_{i,j}\} = \frac{n_1 - i - j + 1}{j} \frac{P_3(\Gamma)}{P_1(\Gamma)} P(A_{i,j-1}),$$

где $i = 0, 1, 2, \ldots, n_1 - 1$, $j = 1, 2, \ldots, n_1 - i$;

$$P\{D_{0,0,0}/A_{i,j}\} = [P_1(\Pi)]^{(n_1 - i - j)n_2} [1 - P_2(\Pi)]^{jn_2};$$

$$P\{D_{a,0,0}/A_{i,j}\} = \frac{(n_1 - i - j)n_2 - a + 1}{a} \frac{P_2(\Pi)}{P_1(\Pi)} P\{D_{a-1,0,0}/A_{i,j}\}$$

$(a = 1, 2, \ldots, (n_1 - i - j)n_2)$;

$$P\{D_{a,b,0}/A_{i,j}\} = \frac{(n_1 - i - j)n_2 - a - b + 1}{b} \frac{P_3(\Pi)}{P_1(\Pi)} P\{D_{a,b-1,0}/A_{i,j}\},$$

где $a = 0, 1, 2, \ldots, (n_1 - i - j)n_2 - 1$, $b = 1, 2, \ldots, (n_1 - i - j)n_2 - a$;

$$P\{D_{a,b,c}/A_{i,j}\} = \frac{jn_2 - c + 1}{c} \frac{P_2(\Pi)}{1 - P_2(\Pi)} P\{D_{a,b,c-1}/A_{i,j}\},$$

где $a = 0, 1, 2, \ldots, (n_1 - i - j)n_2$;

$b = 0, 1, 2, \ldots, (n_1 - i - j)n_2 - a$;

$c = 1, 2, \ldots, (jn_2)$.

IV. Формулы для вычисления $p_з$ и $p_л$:

$$p_з = \sum_{l=0}^{n} \sum_{m=0}^{n-l} \frac{P\{B_{l,m}\}}{Q\{з/B_{l,m}\}};$$

$$p_л = \sum_{l=0}^{n-1} \sum_{m=1}^{n-l} \frac{m}{\rho_2} \frac{Q\{з/B_{l+1,m-1}\}}{Q\{з/B_{l,m}\}}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Формулы для расчета условной вероятности $P\{з/B_{l,m}B_{l',m'}\}$ для различных законов распределения числа занятых линий в звеньях

I. Распределение Бернулли—Бернулли

$$P\{з/B_{l,m}B_{l',m'}\} = (b_1 + c_1 - b_1c_1)^{n-l-l'-m-m'} \times$$

$$\times (b_2 + c_1 - b_2c_1)^m (b_1 + c_2 - b_1c_2)^{m'}.$$

II. Распределение Бернулли—Эрланг

$$P\{з/B_{l,m}B_{l'm'}\} = \left\{\int_0^\infty e^{-x}\left[b_1 x + \frac{\lambda_2}{n-l}\left(\frac{n-l-m}{\nu_1} + \right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left. + \frac{m}{\nu_2}\right)\right]^{n-l-m-l'-m'}\left[b_2 x + \frac{\lambda_2}{n-l}\left(\frac{n-l-m}{\nu_1} + \right.\right.\right.$$

$$+\frac{m}{\nu_2}\Big)\Big]^m\left(b_1 x+\frac{\lambda_2}{\nu_2}\right)^{m'}dx\Big\}:\Big\{\int_0^\infty e^{-x}\Big[x+$$

$$+\frac{\lambda_2}{n-l}\left(\frac{n-l-m}{\nu_1}+\frac{m}{\nu_2}\right)\Big]^{n-l'-m'}\left(x+\frac{\lambda_2}{\nu_2}\right)^{m'}dx\Big\}.$$

III. Распределение Эрланг—Эрланг

$$P\{з/B_{l,m}B_{l',m'}\}=\Big\{\int_0^\infty e^{-x}dx\int_0^\infty e^{-u}\Big[\frac{\lambda_2}{n-l}\left(\frac{n-l-m}{\nu_1}+\frac{m}{\nu_2}\right)u+$$

$$+\frac{\lambda_1}{n-l'}\left(\frac{n-l'-m'}{\nu_1}+\frac{m'}{\nu_2}\right)x+\frac{\lambda_2}{n-l}\left(\frac{n-l-m}{\nu_1}+\frac{m}{\nu_2}\right)\frac{\lambda_1}{n-l'}\times$$

$$\times\left(\frac{n-l'-m'}{\nu_1}+\frac{m'}{\nu_2}\right)\Big]^{n-l-m-l'-m'}\Big[\frac{\lambda_2}{n-l}\left(\frac{n-l-m}{\nu_1}+\frac{m}{\nu_2}\right)u+$$

$$+\frac{\lambda_1}{\nu_2}x+\frac{\lambda_2}{n-l}\left(\frac{n-l-m}{\nu_1}+\frac{m}{\nu_2}\right)\frac{\lambda_1}{\nu_2}\Big]^m\Big[\frac{\lambda_2}{\nu_2}u+\frac{\lambda_1}{n-l'}\times$$

$$\times\left(\frac{n-l'-m'}{\nu_1}+\frac{m'}{\nu_2}\right)x+\frac{\lambda_2}{\nu_2}\frac{\lambda_1}{n-l'}\left(\frac{n-l'-m'}{\nu_1}+\frac{m'}{\nu_2}\right)\Big]^{m'}du\Big\}:$$

$$:\Big\{\int_0^\infty e^{-x}\Big[x+\frac{\lambda_1}{n-l'}\left(\frac{n-l'-m'}{\nu_1}+\frac{m'}{\nu_2}\right)\Big]^{n-l-m}\times$$

$$\times\left(x+\frac{\lambda_1}{\nu_2}\right)^m dx\int_0^\infty e^{-x}\Big[x+\frac{\lambda_2}{n-l}\left(\frac{n-l-m}{\nu_1}+\frac{m}{\nu_2}\right)\Big]^{n-l'-m'}\times$$

$$\times\left(x+\frac{\lambda_2}{\nu_2}\right)^{m'}dx\Big\}.$$

В приведенных выше формулах дополнительно введены следующие обозначения: $b_1=\lambda_1/\nu_1 n$; $b_2=\lambda_1/\nu_2 n$; $c_1=\lambda_2/\nu_1 n$; $c_2=\lambda_2/\nu_2 n$. Все интегралы в формулах могут быть вычислены рекуррентно, как показано в приложении II.

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

Формулы для расчета условных вероятностей $P\{лA/B_{l,m}B_{l',m'}\}$ **и** $P\{лB/B_{l,m}B_{l',m'}\}$

I. Распределение Бернулли

$$P\{л\,A/B_{l,m}B_{l',m'}\}=\frac{m}{n-l-l'};$$

$$P\{л\,B/B_{l,m}B_{l',m'}\}=\frac{m'}{n-l-l'}.$$

II. Распределение Эрланга

$$P\{л\,A/B_{l,m}\,B_{l',\,m'}\} = \left\{\int_0^\infty m\,e^{-x}\left[x+\frac{\lambda_1}{n-l'}\left(\frac{n-l'-m'}{\nu_1}+\frac{m'}{\nu_2}\right)\right]^{n-l-m}\times\right.$$

$$\left.\times\left(x+\frac{\lambda_1}{\nu_2}\right)^{m-1}dx\right\} : \left\{\int_0^\infty e^{-x}\left[x+\frac{\lambda_1}{n-l'}\left(\frac{n-l'-m'}{\nu_1}+\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.+\frac{m'}{\nu_2}\right)\right]^{n-l-m}\left(x+\frac{\lambda_1}{\nu_2}\right)^m dx\right\};$$

$$P\{л\,B/B_{l,m}\,B_{l',\,m'}\} = \left\{\int_0^\infty m'\,e^{-x}\left[x+\frac{\lambda_2}{n-l}\left(\frac{n-l-m}{\nu_1}+\right.\right.\right.$$

$$\left.\left.\left.+\frac{m}{\nu_2}\right)\right]^{n-l'-m'}\left(x+\frac{\lambda_2}{\nu_2}\right)^{m'-1}dx\right\} : \left\{\int_0^\infty e^{-x}\left[x+\frac{\lambda_2}{n-l}\times\right.\right.$$

$$\left.\left.\times\left(\frac{n-l-m}{\nu_1}+\frac{m}{\nu_2}\right)\right]^{n-l'-m'}\left(x+\frac{\lambda_2}{\nu_2}\right)^{m'}dx\right\}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ V

ЧИСЛА СТИРЛИНГА 2-го РОДА, $s(n, r)$

n	При r									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1									
2	1	1								
3	1	3	1							
4	1	7	6	1						
5	1	15	25	10	1					
6	1	31	90	65	15	1				
7	1	63	301	350	140	21	1			
8	1	127	966	1701	1050	266	28	1		
9	1	255	3025	7770	6951	2646	462	36	1	
10	1	511	9330	34105	42525	22827	5580	750	45	1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Суторихин Н. Б.** Оценка надежности элементов коммутируемых телефонных сетей. М.: Связь, 1974.
2. **Гнеденко Б. В., Козлов Б. А., Ушаков И. А.** О роли и месте теории надежности в процессе создания сложных систем. — В кн.: Теория надежности и массовое обслуживание. М.: Наука, 1969, с. 14—32.
3. **Рогинский В. Н.** Проблемы надежности сетей связи. — Электросвязь. 1970, № 9, с. 79—81.
4. **Вычислительная** техника для управления производственными процессами: Справочник/Под ред. Ю. С. Вальденберга. М.: Энергия, 1971.
5. **Иванова О. Н., Попова А. Г., Соловой Ю. В.** Управляющие устройства квазиэлектронных коммутационных систем. М.: Связь, 1975.

6. **Лазарев В. Г.** Электронная коммутация и управление в узлах связи. М.: Связь, 1974.
7. **Лазарев В. Г., Саввин Г. Г.** Сети связи, управление и коммутация. М.: Связь, 1973.
8. **Гаркави А. Л., Гоголевский В. Б., Грабовецкий В. П.** Влияние периодичности контроля на надежность восстанавливаемых устройств. — В кн.: Технические средства автоматики. М.: Наука, 1971, с. 109—116.
9. **Буров П. Н., Голомшток Л. В., Зарецкий К. А., Суторихин Н. Б.** Влияние периодичности контроля на потери в ЭАТС. — Электросвязь. 1977, № 2, с. 40—44.
10. **Мархай Е. В., Рогинский В. Н., Харкевич А. Д.** Автоматическая телефония. М.: Связь, 1960.
11. **Мисуловин Л. Я.** Структура управляющих устройств с записанной программой для АТС. — Электросвязь. 1977, № 2, с. 36—40.
12. **Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н.** Введение в теорию массового обслуживания. М.: Наука, 1966.
13. **Козлов Б. А., Ушаков И. А.** Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975.
14. **Риордан Д.** Введение в комбинаторный анализ: Пер. с англ./Под ред. Л. Я. Куликова. М.: ИЛ, 1966.
15. **Буров П. Н., Зарецкий К. А., Суторихин Н. Б.** О выборе критерия качества функционирования сложных восстанавливаемых технических систем массового обслуживания. В кн.: Доклад на Всесоюзном научно-техническом семинаре «Оптимизация технических систем»: Тезисы докладов. Ч. 1. Новосибирск, 1976, с. 20—21.
16. **Шахбазов А. А.** О некоторых задачах теории массового обслуживания: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. М.: 1962. В надзаг.: МГУ.
17. **Ершов В. А.** Применение ЭВМ для расчета коммутационных систем интегральной цифровой сети связи. М.: МЭИС, 1974.
18. **Шнепс М. А.** Численные методы теории телетрафика. М.: Связь, 1974.
19. **Новая** техника и методы эксплуатации АТС: Инфор. сб. М.: Связь, 1963.
20. **Semprini Pio, Casalini Alberto.** Mittel und Methodik der Unterhaltung von Fernsprech—Wuhlamtern in Jtalien—Telefon-Rept, 1974, v. 10, № 1—2, p. 23—30.
21. **Структура** электронных управляющих устройств АТС: Информ. сб. М.: Связь, 1971.
22. **Буров П. Н., Мейкшан В. И.** Оптимизация системы технического обслуживания коммутационных узлов сетей связи. — В кн.: Доклад на Всесоюзном научно-техническом семинаре «Оптимизация технических систем»: Тезисы докладов. Ч. 1. Новосибирск, 1976, с. 96—97.
23. **Буров П. Н., Суторихин Н. Б.** Оценка и определение требований к надежности оборудования ИЦСС. — В кн.: Доклад на Всесоюзном совещании по развитию средств автоматической коммутации: Тезисы докладов. М.—Киев, 1973, с. 70—71.
24. **Джейсуол Н.** Очереди с приоритетами: Пер. с англ./Под ред. В. В. Калашникова. М.: Мир, 1973.
25. **Игнатов В. А., Маньшин Г. Г., Трайнев В. А.** Статистическая оптимизация качества функционирования электронных схем./Под ред. Е. Г. Коновалова. М.: Энергия, 1974.
26. **Саати Т.** Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: Сов. радио, 1971.
27. **Горелик М., Ефимов И., Карасева Е.** Как определять народнохозяйственную эффективность междугородной телефонной связи. — Вестник связи. 1975, № 7, с. 26—28.
28. **Горелик М., Карасева Е.** О нормативах и оценке народнохозяйственной эффективности междугородной телефонной связи. — Вестник связи. 1975, № 8, с. 30—31.
29. **Инструкция** по нормированию расхода важнейших материалов и запасных частей на ремонтно-эксплуатационные нужды хозяйства связи. М.: Связь, 1969.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3
Введение 5

Глава 1. **Обеспечение надежности элементов сетей связи** 14

1.1. Общие положения 14
1.2. Способы обеспечения надежности управляющих устройств коммутационных узлов и станций 15
1.3. Надежность устройства при различных способах контроля работоспособности 17
1.4. Надежность управляющего комплекса при различных методах резервирования и контроля работоспособности оборудования 21
1.5. Дублирование функциональных блоков при нагруженном резерве и комбинированном контроле 26
1.6. Обеспечение надежности оборудования каналов и трактов . . . 28
1.7. Надежность индивидуального оборудования каналов 28
1.8. Надежность оборудования групповых трактов 32
1.9. Надежность линейного тракта кабельной магистрали 35

Глава 2. **Оценка качества обслуживания телефонных вызовов с учетом ненадежности и способов контроля приборов коммутационной системы** . 39

2.1. Общие соображения . . . . . .
2.2. Расчет показателей качества обслуживания вызовов в полнодоступной группе приборов коммутационной системы с учетом ненадежности и способов контроля работоспособности приборов 40
2.3. Расчет показателей качества обслуживания вызовов в двухзвенной коммутационной системе с учетом ненадежности и способов контроля работоспособности линий 48
2.4. Оценка качества обслуживания вызовов в сложных коммутационных системах с учетом ненадежности и способов контроля работоспособности оборудования 51

Глава 3. **Определение требуемой надежности элементов сетей связи при заданной трудоемкости технического обслуживания** 52

3.1. Основные методы организации технического обслуживания элементов сетей связи 52
3.2. Определение требуемой надежности блоков оборудования узлов и станций при заданных трудоемкости технического обслуживания и качестве обслуживания вызовов 60
3.3. Определение среднего времени ожидания ремонта 64

Глава 4. **Определение оптимальной надежности элементов сетей связи по экономическому критерию** 76

4.1. Общие положения 76
4.2. Определение оптимальной надежности элементов сетей связи по минимуму затрат и потерь 78
4.3. Определение оптимальной надежности элементов сетей связи по максимуму отдачи на вложенные средства 85

Стр.

4.4. Определение оптимальной надежности оборудования каналов и групповых трактов 86
4.5. Определение оптимальной надежности проектируемых элементов сетей связи на основе данных о затратах и потерях для аналогичного оборудования 91

Приложение I. **Расчет вероятностей состояний в полнодоступной группе приборов различной производительности** 95

Приложение II. **Рекуррентные формулы для вычисления вероятности потерь в полнодоступной группе приборов с учетом ненадежности и периодического контроля работоспособности оборудования** 97

Приложение III. **Формулы для расчета условной вероятности $P\{з/B_{l,\,m}B_{l',\,m'}\}$ для различных законов распределения числа занятых линий в звеньях** 98

Приложение IV. **Формулы для расчета условных вероятностей** $P\{лA/B_{l,\,m}B_{l',\,m'}\}$ **и** $P\{лB/B_{l,\,m}B_{l',\,m'}\}$ 99

Приложение V. **Числа Стирлинга 2-го рода,** $s(n, r)$ 100

Список литературы 100

ИБ № 59

НИКОЛАЙ БОРИСОВИЧ СУТОРИХИН,
ПЕТР НИКИТОВИЧ БУРОВ,
СОФЬЯ МИХАЙЛОВНА ЗАХАРОВА

Методы определения оптимальной надежности элементов сетей связи

Ответственный редактор Н. Б. Суторихин
Редактор Н. М. Улановская
Художественный редактор Р. А. Клочков
Технический редактор Л. К. Грачева
Корректор Г. Ф. Кцоева

Сдано в набор 14/VIII 1978 г. Подп. в печ. 16/XI 1978 г.
Т-18682 Формат 60×90¹/₁₆ Бумага тип. № 1 Гарнитура литературная Печать высокая
6,5 усл. печ. л. 7,25 уч.-изд. л. Тираж 4200 экз. Изд. № 17338 Зак. № 217
Цена 40 коп.
Издательство «Связь». Москва 101000, Чистопрудный бульвар, д. 2

Типография издательства «Связь» Госкомиздата СССР
Москва 101000, ул. Кирова, д. 40

40 к.